

Raport științific final
al Proiectului PN-III-P4-ID-PCE-2020-1361
Analiza si prognoza seismicității României
(Analysis and Forecasting of Romanian Seismicity)
AFROS
2021 – 2023

Competiția:	Proiecte de cercetare exploratorie (PCE 2020)
Nr. contract:	PCE 119/2021
Cod proiect:	PN-III-P4-ID-PCE-2020-1361
Domeniul de cercetare:	Științele Pământului
Titlul:	Analiza si prognoza seismicității României
Acronim:	AFROS
Data începere proiect:	04/01/2021
Data finalizare proiect:	31/12/2023
Durata (luni):	36
Buget total:	1.198.032,00
Sursa 1 Bugetul de stat	1.198.032,00
Sursa 2 Alte surse atrase:	0 lei
Pagina web proiect:	http://afros.infp.ro/
Instituția coordonatoare:	Institutul National De Cercetare Dezvoltare pentru Fizica Pământului (INCDFP RA), Măgurele, Romania
Director de proiect:	Enescu Bogdan Dumitru

Plan de realizare a proiectului

Tip Inreg.	Denumire Etapă	Tip act	Rezultate	Dată Raportare
	Denumire Activitate			
Etapa 1	Proiectarea și implementarea algoritmului pentru investigarea seismicității de adâncime intermediară din zona Vrancea	-	<ul style="list-style-type: none"> ● Creșterea expertizei în analiza seismicității (inclusiv însușirea unor tehnici ML) a celor 2 doctoranzi – raport de instruire; ● Realizare pagină web 	31/12/2021
Act 1.1	Selecția algoritmului de prognoză, descrierea și proiectarea software-ului	A1	<ul style="list-style-type: none"> ● Modelarea seismicității subcrustale și algoritmi de prognoză - <i>raport de cercetare;</i> 	31/12/2021
Act 1.2	Aplicarea, testarea și calibrarea algoritmilor de prognoză	A1	<ul style="list-style-type: none"> ● Estimarea și prognozarea parametrilor seismicității de adâncime intermediară – <i>raport de cercetare;</i> 	31/12/2021
Etapa 2	Proiectarea și implementarea algoritmului pentru investigarea seismicității superficiale, crustale din România	-	<ul style="list-style-type: none"> ● Creșterea expertizei în analiza seismicității a celor 2 doctoranzi – raport de instruire; ● 2 lucrări ISI și 2 prezentări conferințe ● Actualizare pagină web 	31/12/2022
Act 2.1	Selecția algoritmului de prognoză, descrierea și proiectarea software-ului	A1	<ul style="list-style-type: none"> ● Modelarea seismicității subcrustale și algoritmi de prognoză - <i>raport de cercetare;</i> 	31/12/2021
Act 2.2	Aplicarea, testarea și calibrarea algoritmilor de prognoză	A1	<ul style="list-style-type: none"> ● Estimarea și prognozarea parametrilor seismicității superficiale, crustale – <i>raport de cercetare;</i> 	31/12/2022
Etapa 3	Integrarea și implementarea algoritmului general de prognoza	-	<ul style="list-style-type: none"> ● 2 lucrări ISI și 2 prezentări conferințe; ● Pliante explicative; pagină web adusa la zi 	31/12/2023
Act 3.1	Integrarea datelor geofizice în sistemul de prognoză	A1	<ul style="list-style-type: none"> ● Corelații între observațiile geofizice și seismicitate – <i>parte a raportului de cercetare final;</i> 	31/12/2023
Act 3.2	Construirea arhitecturii aplicației virtuale și agregarea datelor seismice și geofizice în platforma	A1	<ul style="list-style-type: none"> ● Proiectarea platformei pentru vizualizarea datelor și detectarea eventualelor anomalii - <i>parte a raportului de cercetare final;</i> 	31/12/2023
Act 3.3	Implementarea platformei		<ul style="list-style-type: none"> ● Implementarea platformei - <i>parte a raportului de cercetare final.</i> 	31/12/2023

*A1 - Cercetare fundamentala

Cuprins

1. **Prezentare generală a realizării obiectivelor proiectului, cu punerea în evidență a rezultatelor și gradul de realizare a obiectivelor.**
2. **Etapa 1: Proiectarea și implementarea algoritmului pentru investigarea seismicității de adâncime intermediară din zona Vrancea.**
3. **Etapa 2: Proiectarea și implementarea algoritmului pentru investigarea seismicității superficiale, crustale din România.**
4. **Etapa 3: Integrarea și implementarea algoritmului general de prognoza.**
5. **Gradul de atingere a rezultatelor estimate și impactul rezultatelor obținute, cu sublinierea celui mai semnificativ rezultat obținut.**
6. **Exploatarea și diseminarea rezultatelor proiectului. Planuri de viitor.**
7. **Prezentarea livrabililor/indicatorilor obținuți la finalul proiectului comparativ cu cei propuși.**

Nota: Un rezumat succint al proiectului, pentru public, poate fi găsit pe pagina de web a proiectului, în Romana și Engleza (la link-urile de mai jos), precum și în Anexele 11 și 12 ale proiectului.

Romana:

<http://afros.infp.ro/proiect.php>

Engleza:

http://afros.infp.ro/proiect_en.php

Anexa 13 conține documentația platformei virtuale, iar Anexa 14 cuprinde raportul de față în Engleza.

1. Prezentare generală a realizării obiectivelor proiectului, cu punerea în evidență a rezultatelor și gradul de realizare a obiectivelor.

Proiectul AFROS a avut ca obiectiv general analiza seismicității României, atât pentru cutremurele subcrustale, de adâncime intermediară (60 – 180 km) din zona Vrancea, cât și pentru cele crustale, de adâncime superficială (0 – 60 km) de pe tot teritoriul României, și dezvoltarea și implementarea unor algoritmi de prognoza a activității seismice, pentru cele două tipuri de seismicitate. Primul an al proiectului (*Etapa 1*) a abordat seismicitatea subcrustală din zona Vrancea, în timp ce în anul al doilea (*Etapa 2*), eforturile s-au concentrat pe analiza și prognoza seismicitatea crustală. În cel de-al treilea an al proiectului (*Etapa 3*), obiectivele principale au fost integrarea datelor geofizice în sistemul de prognoza, și proiectarea/implementarea unei platforme virtuale pentru prognoza seismicității.

Așa după cum vom detalia la prezentarea rezultatelor științifice pentru Etapa 1, principalul rezultat al primului an a fost implementarea unor parametri statistici pentru analiza și prognoza seismicității intermediare, precum parametrul Z (Z-value), parametrii PI/RI și aplicarea unui nou algoritm pentru separarea seismicității de fond de cea de replici și preșocuri. Parametrul Z a fost calibrat astfel încât să poată fi aplicat pentru detectarea unor eventuale anomalii cu caracter precursor.

În Etapa 2 a proiectului, accentul s-a pus pe caracterizarea/prognoza seismicității crustale. Pe de o parte, algoritmi PI/RI de prognoza au fost dezvoltați și implementați pentru cutremurele crustale. Pe de altă parte, secvența de cutremure din regiunea Gorj a fost analizată și un nou algoritm pentru prognoza replicilor seismice a fost implementat cu succes.

Activitățile din Etapa 3 s-au concretizat în implementarea unui sistem de monitorizare a diverși parametri geofizici și seismici și definirea unor valori de prag pentru specificarea unei alerte seismice. Platforma virtuală a proiectului, care poate fi accesată de pe pagina de web a proiectului, implementează diverși algoritmi de analiza și prognoza, bazați atât pe date în timp-real, cât și pe catalogul de cutremure ROMPLUS, care este varianta definitivă a listei de cutremure produse pe teritoriul României din anul 984 până în prezent.

În timpul implementării Etapei 1 și 2 a proiectului, au fost întâmpinate unele dificultăți în ceea ce privește calitatea catalogului ROMPLUS. În particular, s-au detectat unele schimbări în localizarea cutremurelor adânci și modificări subtile ale scării de magnitudine, care își au în parte originea în schimbarea unor algoritmi de localizare care au avut loc în anul 2014. Această constatare a lansat un efort amplu de crearea a unui catalog de cutremure omogen, care este în continua desfășurare.

Din scurta trecere în revista de mai sus, apreciem că proiectul și-a îndeplinit toate obiectivele sale majore, cu toate că „drumul” nu a fost scutit de dificultăți. Pe lângă rezultatele de cercetare, menționăm instruirea studenților doctoranzi (Etapa 1 și 2), precum și organizarea a numeroase seminare cu invitarea unor cercetători din domeniu să susțină prezentări și cursuri de instruire. Un număr de 13 lucrări ISI (jurnale înregistrate în Web of Science, WoS) au fost publicate ca parte integrantă a proiectului. Membrii ai proiectului au fost adeseori intervievați în mass-media din țară și de peste hotare, în special în ceea ce privește activitatea seismică din Gorj. Activitățile începute și desfășurate în timpul proiectului vor continua în viitor, spre exemplu cu aplicarea tehnicilor de tip machine-learning (ML) pentru analiza seismicității.

2. Etapa 1: Proiectarea și implementarea algoritmului pentru investigarea seismicității de adâncime intermediară din zona Vrancea.

Prima etapa a proiectului a fost dedicată analizei și modelării seismicității de adâncime intermediară din Vrancea, precum și dezvoltarea, calibrarea și aplicarea unor algoritmi de prognoza. În prima etapă s-au testat mai mulți algoritmi de prognoza (activitatea Act 1.1), s-au selectat algoritmi care au dovedit cele mai bune rezultate și s-au realizat codurile pentru modelarea seismicității subcrustale. Algoritmii selectați pentru analiza și prognoza seismicității subcrustale sunt: M_c (caracterizarea magnitudinii de completitudine a datelor), precum și, pentru prognoza efectivă, parametrul b (b -value din relația frecvență-magnitudine a cutremurelor), testul statistic Z (Z -value), testul statistic Beta (β -value) și testele statistice PI, RI. Aplicarea și testarea extensivă, precum și calibrarea algoritmilor de prognoză selectați s-a făcut în cadrul activității Act 2.2.

Pentru început prezentăm pe scurt metodologia Z -value, care este una din metodologiile testate pentru prognoza seismicității, și un rezultat recent (care poate fi vizualizat și pe Platforma Virtuală a proiectului).

Parametrul Z este un parametru statistic, care poate fi folosit pentru a indica o relativă creștere sau descreștere a ratei seismicității între două perioade de timp; este definit matematic astfel:

$$Z = \frac{m_1 - m_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (1)$$

unde,

- m_1 și m_2 reprezintă media ratei de cutremure pentru 2 perioade (W_1 și W_2) pe care dorim să le comparăm;
- n_1 , n_2 și s_1 , s_2 sunt, respectiv, numerele de cutremure și deviațiile standard pentru cele 2 perioade de timp.

Prezentarea variației parametrului Z este arătată pe o secțiune de adâncime orientată SW – NE, prin zona Vrancea. Prezentăm rezultate doar pentru gama de adâncimi ale cutremurelor intermediare (subcrustale). Scopul este acela de a detecta intervale de adâncime, care pentru anumite perioade de timp prezintă o activitate anormală ce poate fi activitate precursoră.

Algoritmii de calcul pentru a produce secțiunile pe adâncime ale „ Z -value” este:

1. Pe o secțiune SW-NE sunt proiectate toate cutremurele de adâncime intermediară din zona Vrancea ($h \geq 60$ km), cu $M \geq 3.0$.
2. Pe planul definit la (1), se formează o rețea care are distanța între noduri de 5km x 5km, care acoperă majoritatea cutremurelor din secțiune (vezi Figura 12 din raportul proiectului pe 2021). (Raport 2021: http://afros.infp.ro/documente/raport_AFROS_2021_RO.pdf).

3. Pentru fiecare nod al rețelei, cele mai apropiate 100 de cutremure sunt selectate pentru calculul parametrului Z.
4. Parametrul Z este calculat, pentru fiecare nod, folosind formula de mai sus.
5. Valorile parametrului Z sunt interpolate pentru a crea figura care arata distribuția parametrului de-a lungul secțiunii, pe adâncime (Figura 13 din raportul pe 2021).

O valoare pozitivă a parametrului Z (culori calde pe harta) reprezintă o seismicitate relativ scăzută în fereastra W2 comparat cu W1, în timp ce o valoare negativă (culori reci pe harta) reprezintă o activare a seismicității în fereastra W2 comparat cu W1. Fereastra W1 este variabila și va fi definită aici din anul 2004 până la momentul de la care începe fereastra W2. Ideal, o fereastra W1 mai lungă oferă o aproximare mai bună a seismicității de fond, dar alte variante (e.g., fereastra W1 cu lungime fixă pot fi de asemenea considerate). Fereastra W2 se extinde de la momentul pentru care se determină parametrul Z și are o lungime definită de 1.5 ani. *Denumim fereastra W1 fereastra cu seismicitatea de fond, și fereastra W2 fereastră de monitorizare. Valorile parametrului Z au aceeași interpretare în termeni ai semnificației statistice precum numărul de deviații standard de la valoarea medie pentru o distribuție normală.* Secțiunile afișate au fost calculate începând cu anul 2020, la fiecare trei luni.

Bazat pe studii anterioare și propriile noastre investigații, valori ale parametrului Z, în valoare absolută mai mari ca 5.0, sunt considerate anormale. În special valori largi, pozitive, au fost asociate cu lacune seismice precursore (e.g., Enescu et al., 2001).

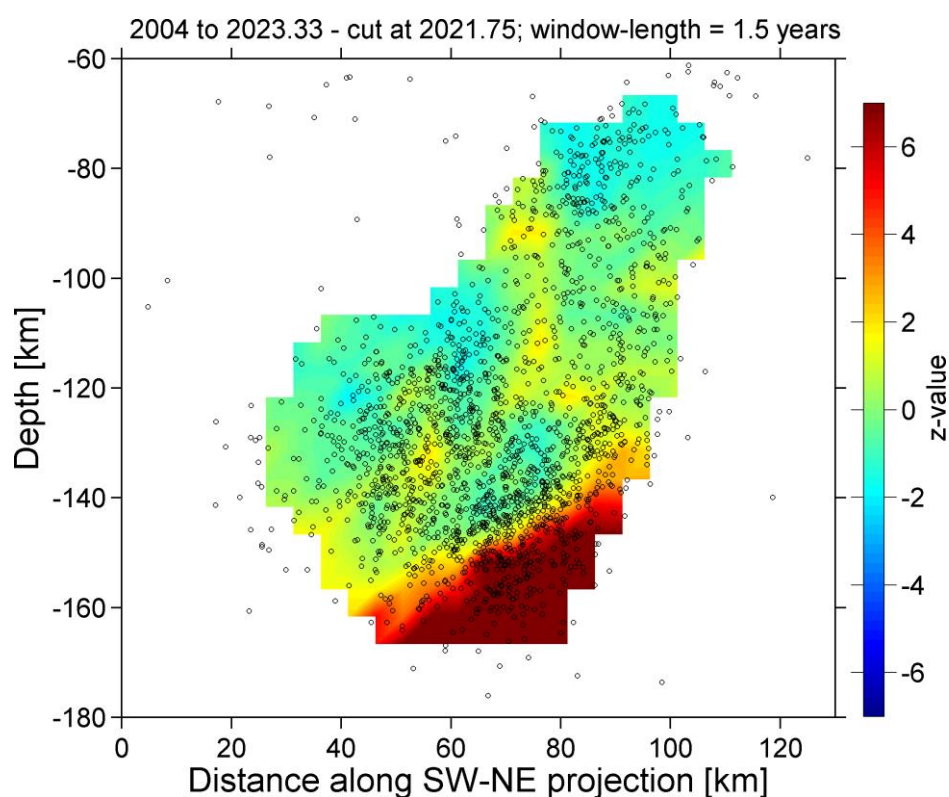


Figura 1. Secțiune verticală prin zona Vrancea, care arată variația parametrului Z, pentru seismicitatea subcrustală ($H < 60$ km). Pentru explicații, vezi te rog textul de mai sus, precum și documentația platformei virtuale. Fereastra W2 se extinde între Octombrie 2021 - Martie 2023.

Ca *nota* importanta, valorile ridicate ($Z > 5.0$) (cu roșu pe secțiune), care se observa la adâncimi sub ~140 km, sunt legate de unele schimbări ale metodei de localizare a cutremurelor care a avut loc în anul 2014 (vezi raportul pe anul 2021 al proiectului).

Bazat pe astfel de secțiuni, harți sau grafice, putem afirma ca în prezent nu ne aflăm într-o perioada seismică anomala (pe termen mediu) în zona Vrancea, domeniul subcrustal.

Un al doilea rezultat, este legat de variația unui alt parametru statistic, beta-value (β -value), pe care deasemenea l-am investigat ca posibil parametru, care poate detecta activările și lacunele de seismicitate (prezentate în lucrarea Enescu et al., 2023), pentru seismicitatea subcrustala din Vrancea.

Cuantificarea modificărilor ratei seismicității bazata pe statistica parametrului „beta” (β -value) este sensibilă la diferența ratelor medii de seismicitate în două perioade de timp și este definită astfel:

$$\beta = \frac{N_a - NT_a/T}{\sqrt{N(\frac{T_a}{T}) (1 - \frac{T_a}{T})}} \quad (2)$$

unde N este numărul de cutremure din fereastra de fond seismic, T și Na este numărul de evenimente dintr-o perioadă de timp de interes, Ta. Fereastra de fond, T, acoperă întreaga perioadă a setului de date analizat, cu excepția Ta; fereastra Ta, aleasă aici ca 1.5 ani, este deplasată de-a lungul întregii perioade cu un pas de 14 zile. Alegerea lui Ta = 1.5 ani este oarecum arbitrară; am evitat să alegem ferestre lungi care nu ar fi sensibile la creșteri sau scăderi relativ scurte, dar semnificative, ale ratei seismicității, precum și ferestre prea scurte, care pot dezvălui doar fluctuații foarte locale de seismicitate. Pentru a estima semnificația statistică a valorilor beta obținute, am simulat 10.000 de seturi aleatorii de cutremure, având aceleași intervale de timp și număr de evenimente ca datele reale, și estimat valorile „beta” în același mod ca și pentru setul de date real. Valorile beta obținute pentru cataloagele cutremurelor aleatoare urmează o distribuție normală. Semnificația statistică a valorilor „beta” obținute pentru datele reale este interpretată în termeni de abateri de la media distribuției normale.

Figura 2 prezintă variația parametrului „beta” în funcție de timp pentru intervalul 1960 – 2000. Valorile parametrilor sunt reprezentate la sfârșitul ferestrei de 1.5 ani. Se poate observa că cea mai proeminentă valoare „beta” negativă, care indică o scădere relativă a seismicității, a început în jurul anului 1970 (cu un minim de -3.1 atins la începutul lunii februarie 1971) și au continuat până la momentul cutremurului de magnitudine M7.4 din Vrancea, din 1977, când parametrul a început să crească brusc. Cea mai mare valoare beta pozitivă (de +6,81), a fost înregistrată în ianuarie 1988, într-o fereastră (de 1.5 ani) care include cutremurul de magnitudine M7.1 din Vrancea produs pe 30 august 1986. Valoarea negativă este interpretată ca o anomalie precursoră a cutremurului din 1977, iar cea pozitivă este datorată activității de replici după cutremurul din 1986.

Semnificația statistică a scăderilor și creșterilor seismicității relative a fost evaluată folosind simulări aleatorii de cutremure, așa cum este explicat în paragraful precedent. Rezultatele sunt prezentate în Figura 3. Scăderile seismicității marcate cu Q1 și Q2 preced apariția cutremurului din 4

martie 1977 din Vrancea ($M7.4$) și sunt semnificative la un nivel de încredere de 95% (cu unele părți fiind semnificative la niveluri de încredere și mai mari). Activările seismice marcate cu A1 și A2 în aceeași figură corespund perioadelor de replici care au fost înregistrate după 30 august 1986 și 30 Mai 1990, când două cutremure majore s-au produs în zona Vrancea.

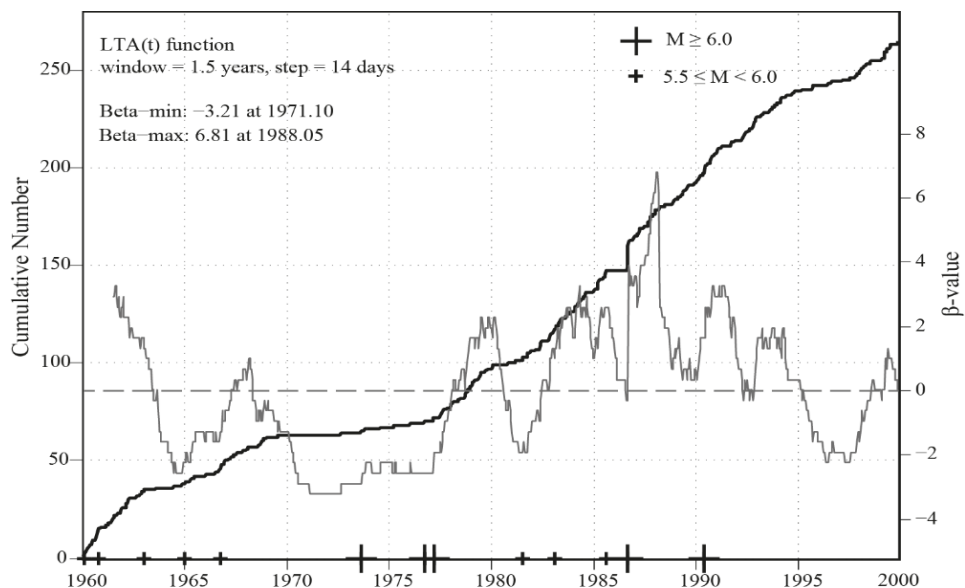


Figura 2. Numărul cumulativ de cutremure (linie neagră) și variația valorii beta (funcția LTA(t), linie gri) pentru cutremurele de adâncime intermediară din Vrancea ($M \geq 4.0$), funcție de timp (intervalul 1960 – 2000). Crucile mari și mici de pe axa de timp indica evenimentele cu magnitudini $M \geq 6.0$ și respectiv $5.5 \leq M < 6.0$.

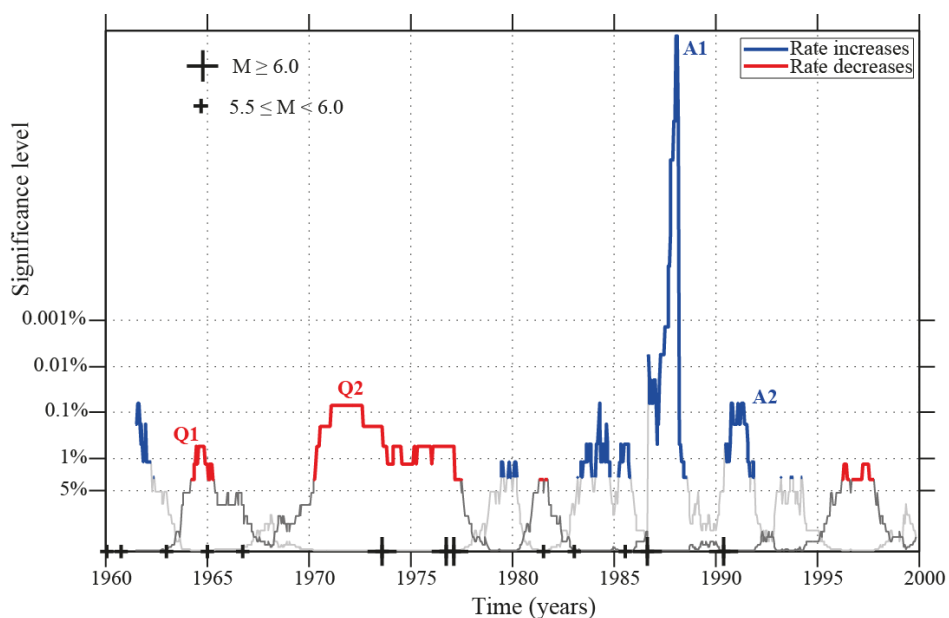


Figura 3. Semnificația creșterilor și scăderilor ratei seismicității pentru cutremurele de adâncime intermediară din Vrancea ($M \geq 4.0$, 1960 – 2000). Culorile albastru și roșu indică ferestre de creștere și respectiv scădere a ratei seismicității, care au niveluri de semnificație sub 5% (niveluri de încredere peste 95%).

Parametrul „beta”, prezentat mai sus și aplicat în lucrarea publicată recent, Enescu et al. (2023), este considerat de asemenea pentru monitorizare, atât în funcție de timp cât și spațiu.

Dintre rezultatele cu relevanță pentru această etapă includem și declanșarea dinamică (datorată stresului provocat de trecerea undelor seismice) a unui cutremur de magnitudine $M_L 3.1$ în zona Vrancea (Anexa 1; Petrescu et al., 2023). Aceste studii au fost realizate în perioada Etapei a treia, după ce cutremurul din Turcia din 5 februarie 2023 a dus la declanșarea cutremurului din zona Vrancea. Monitorizarea cutremurelor induse este considerată de asemenea importantă pentru hazardul și prognoza seismică.

3. Etapa 2: Proiectarea și implementarea algoritmului pentru investigarea seismicității superficiale, crustale din România.

Asemănător cu Etapa 1, în prima activitate (Act 2.1) a Etapei 2 s-au testat mai mulți algoritmi de prognoza, s-au selectat algoritmi care au dat cele mai bune rezultate și s-au realizat codurile pentru modelarea seismicității subcrustale. Algoritmi selectați pentru analiză și prognoza seismicității subcrustale sunt: M_c (caracterizarea magnitudinii de completitudine a datelor), precum și, pentru prognoza efectivă, parametrul b (b -value din relația frecvență-magnitudine a cutremurelor), testele statistice PI, RI, modelul ETAS și un alt algoritm pentru prognoza replicilor seismice.

Menționăm aici în detaliu două rezultate pe care le considerăm notabile pentru Etapa 2. Este vorba despre implementarea algoritmului PI (indexul PI) pentru detectarea anomaliilor de seismicitate (Tiampo, Klein and Enescu, 2023; Tiampo and Enescu, 2023, lucrare în pregătire) și despre un alt algoritm, pentru prognoza replicilor seismice (Ghita et al., 2023, Anexa 2), care a fost implementat recent pe una din cele mai importante secvențe seismice din România, secvența din Gorj, 2023.

Indexul PI se calculează în zonele active seismic pentru magnitudini mai mari decât magnitudinea de completitudine. Zona de interes este divizată folosind o tehnică de tip „gridding” (similar cu calculul variației spațiale a parametrului statistic Z) în mai multe casete (sub-zone) dreptunghiulare. Metoda definește rate de seismicitate, $\psi_{obs}(x_i, t)$, ca numărul de cutremure pe unitatea de timp (un an în cazul nostru) într-o casetă (box) cu locația x_i , la timpul t . Seismicitatea medie reprezentată de funcția $S(x_i, t_0, t)$ pe intervalul $(t - t_0, t)$ este dată de relația:

$$S(x_i, t_0, t) = \frac{1}{(t - t_0)} \int_{t_0}^t \psi_{obs}(x_i, t) dt . \quad (3)$$

$S(x_i, t_0, t)$ este calculat pentru N locații și t_0 este un timp fix, cum ar fi începutul catalogului. Notând mediile spațiale pentru N casete cu $\langle \rangle$, funcția de fază $S'(x_i, t_0, t)$ este definită ca fiind funcția de normă unitară medie zero, obținută din $S(x_i, t_0, t)$:

$$S'(x_i, t_0, t) = \frac{S(x_i, t_0, t) - \langle S(x_i, t_0, t) \rangle}{\|S(x_i, t_0, t)\|} , \quad (4)$$

unde $\|S(x_i, t_0, t)\|$ este rădăcina pătrată a varianței, pentru toate casetele. Funcția definită mai sus poate fi folosită pentru a calcula schimbările temporale și spațiale de seismicitate, între 2 momente

de timp, t_1 și t_2 : $\Delta S'(x_i, t_1, t_2) = S'(x_i, t_0, t_2) - S'(x_i, t_0, t_1)$. În final, este obținută media valorilor lui $\Delta S'(x_i, t_1, t_2)$ pentru toate posibilele valori ale anului de baza, t_0 . În final, indexul PI, ΔP , este obținut ca: $\Delta P(x_i, t_1, t_2) = \{\Delta S'(x_i, t_1, t_2)\}^2 - \mu_p$, unde μ_p este media spațială $\{\Delta S'(x_i, t_1, t_2)\}^2$.

Figura 4 exemplifică aplicarea algoritmului PI pentru o perioadă de termen relativ lung, de 5 ani (perioadele testate au fost de 5 și 10 ani) pe tot teritoriul României, inclusiv zona Vrancea, pe toată gama de adâncimi. Perioada de învățare se extinde pe perioada 1981-1985 și cea de prognoza pe perioada 1986 – 1990. Cutremurele considerate au fost cele cu magnitudini mai mari de 4.0. Din figura se observă anomalii (culori roșii, valori între -0.5 și 0) asociate cu zona Vrancea. Într-adevăr în perioada 1986 – 1990 s-au produs în zona Vrancea două cutremure puternice de magnitudini M7.1 și respectiv M6.9. Din figura se observă că deși câteva anomalii (culori galbene) în domeniul crustal sunt prezente, acestea au intensități relativ mici. Într-adevăr, în perioada respectivă nu s-a produs pe teritoriul României, în zona de adâncimi crustale, nici un cutremur cu magnitudine semnificativă.

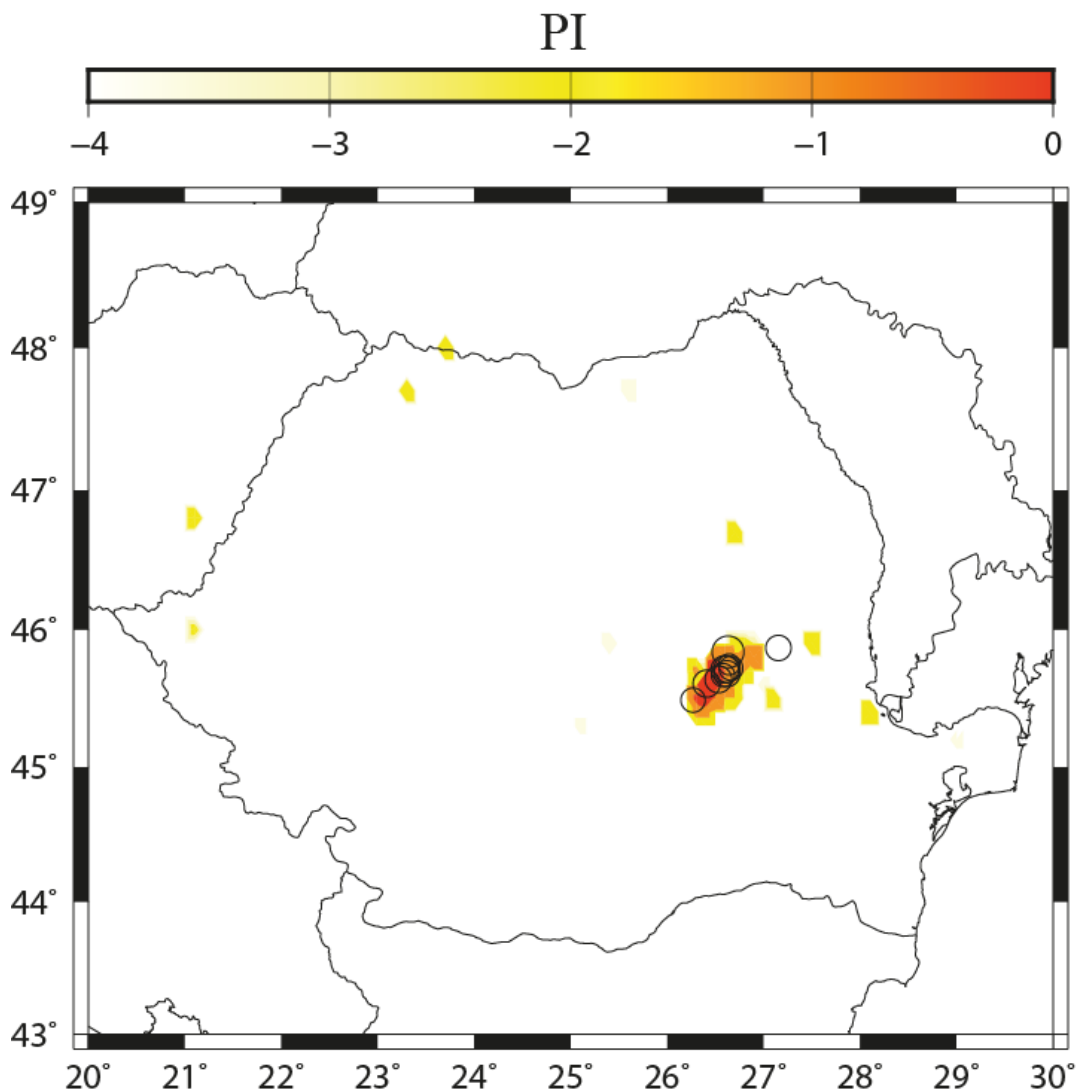


Figura 4. Variația parametrului PI pe teritoriul României în perioada de prognoza 1986-1990 (perioada de învățare 1981 – 1985). Cercurile reprezintă cutremure cu magnitudine mai mare decât 4.0 produse în perioada 1986 – 1990.

Sunt necesare câteva observații:

- 1) Anomaliile din zona subcrustala sunt semnificative si definesc o zona relativ întinsa, comparativ cu anomaliile crustale, care sunt mult mai puțin intense si locale.
- 2) Cutremurele din regiunile crustale au in general magnitudini mai mici decât cele subcrustale din Vrancea si perioade de revenire considerabil mai mari. De aceea, pentru cutremurele crustale, se pot face doar prognoze pe termen lung (de 5, 10 ani), bazat pe datele seismice.
- 3) Este de așteptat ca datele geofizice (Etapa 3) sa aducă îmbunătățiri in ceea ce privește fereastra prognozei, cu alte cuvinte sa facă posibila prognoza pe termen mediu si scurt.
- 4) La momentul actual nu au fost detectate anomalii semnificative in domeniul crustal si subcrustal pe teritoriul României.

Replicile seismice reprezintă un hazard considerabil si, dupa cum secvența din județul Gorj a arătat, pot crea neliniște, inconfort, chiar panica, in rândul populației. De aceea, o componenta integranta a proiectului a avut ca obiectiv dezvoltarea unei metodologii de prognoza a replicilor seismice.

În studiul de față (Ghita et al., 2023, lucrare trimisa spre publicare; **Anexa 2**) am analizat secvențele de cutremure crustale din județul Gorj, din 2023, si din zona Vrancea-Mărășești, din 2014 (Figura 5). In amândouă cazurile, socul principal a avut o magnitudine moment, M_w , de 5.4 (magnitudine locala, M_L , de 5.7).

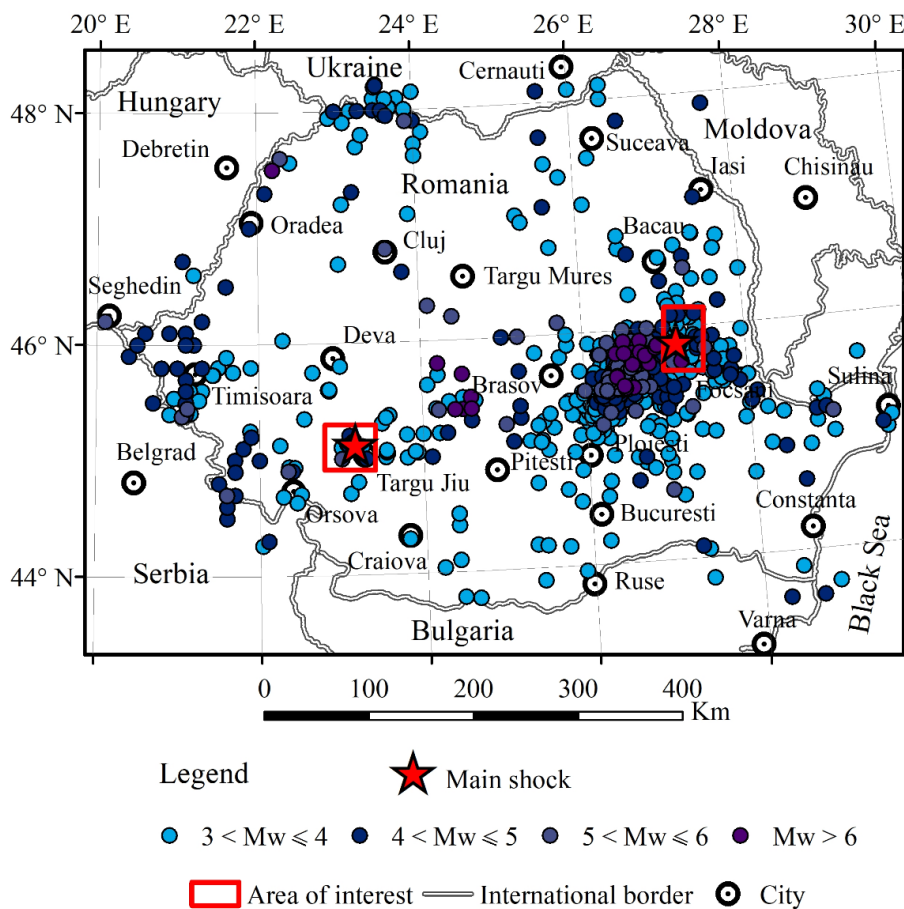


Figura 5. Seismicitatea României (anul 1000 – 2023), cu $M_w > 3.0$. Cu dreptunghiuri sunt marcate zonele Vrancea-Mărășești (la est) și Gorj (la sud-vest). Perioada catalogului este 12.05.1022 –

26.10.2023. In acest raport discutăm doar secvența Gorj (in **Anexa 2** sunt discutate amandoua secvențele).

Prelucrarea datelor a constat in estimarea parametrilor legii Omori-Utsu și estimările probabilităților de replici. Metodele utilizate sunt descrise pe scurt mai jos.

Legea Omori-Utsu (e.g., Utsu et al., 1995) este o relație empirică care descrie scăderea ratei de replici în urma unui șoc principal, așa cum este exprimată prin formula:

$$N(t) = \frac{K}{(t + c)^p} \quad (5)$$

unde, $N(t)$ reprezintă funcția ratei de replici la timpul t (în zile) după șocul principal, în timp ce K , c și p sunt parametri dependenți de secvența cutremurului.

Formula de mai sus poate fi folosită pentru a calcula rata replicilor de o anumită magnitudine:

$$\lambda(t, M) = \frac{K}{(t + c)^p} \beta e^{-\beta(M - M_0)} \quad (6)$$

unde parametrul M_0 este magnitudinea șocului principal și valoarea β este legată de valoarea parametrului „ b ” din distribuția frecvența-magnitudine a cutremurelor (Gutenberg și Richter, 1944) (a nu se confunda cu parametrul „beta” din secțiunea precedentă). Probabilitatea replicilor seismice (deci implicit prognoza lor) este calculată printr-o metodă Bayesiană (Omi et al., 2019), bazată pe modelele Omori-Utsu și frecvența-magnitudine a cutremurelor. Prezentăm mai jos estimările noastre pentru secvența din județul Gorj. Figura 6 prezintă secvența seismică din zona Gorj.

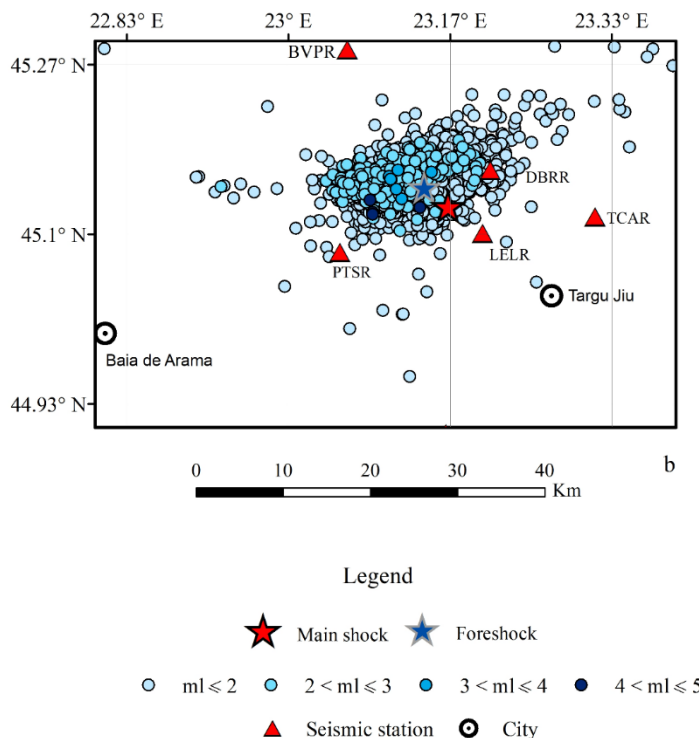


Figura 6. Secvența seismică din județul Gorj, înregistrată in luna Februarie 2023 (soc principal, Mw 5.4).

Prezentam in Figura 7a evoluția numărului cumulativ de replici ale secvenței, precum și prognoza seismică. Figura 7b arată prognoza relației frecvență-magnitudine și datele observate efectiv.

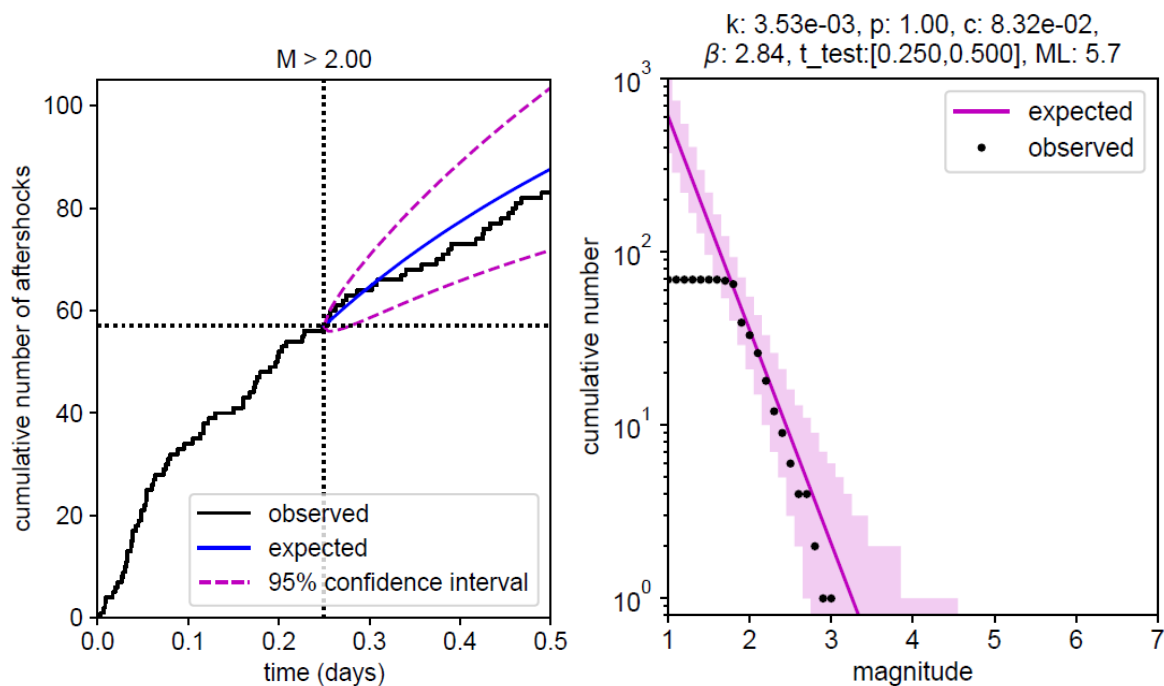


Figura 7. a) Prognoze ale numărului cumulativ de replici pentru zona Gorj: valori așteptate (albastru) versus valori observate (negru) pentru perioada de prognoză [6h, 12h], cu perioada de învățare [0, 6h] după șocul principal. Liniile roz punctate indică intervalul de confidență; b) Relația frecvență-magnitudine pentru secvența din Gorj. Valorile parametrilor legii Omori-Utsu și valoarea β estimată în timpul învățării sunt specificate deasupra graficului.

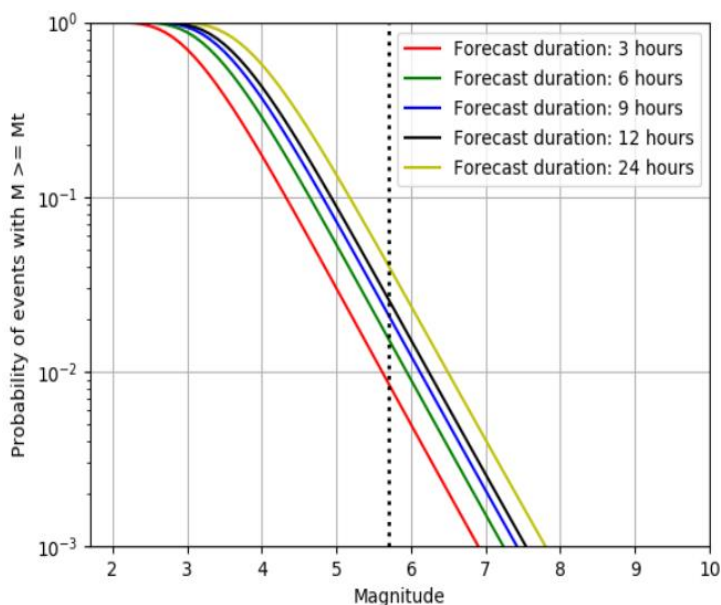


Figura 8. Prognoze probabilistice ale replicilor ca funcții de magnitudine pentru secvența Gorj, cu o perioadă de învățare de 6 ore de la șocul principal. Perioadele de prognoză variază de la 3 la 24 de ore după perioada de învățare. Linia punctată verticală reprezintă mărimea șocului principal, în timp ce M_t reprezintă valoarea magnitudinii.

Figura 8 prezintă probabilitățile replicilor seismice funcție de magnitudine, pentru diferite intervale de predicție. Astfel de grafice pot fi folosite pentru a face prognoze specifice: de exemplu, probabilitatea unui cutremur cu magnitudine egală sau mai mare cu a socului principal (Mw 5.4), între 6 și 9 ore după socul principal (curba roșie în Figura 8), este de aproximativ 1%, deci extrem de mică. Pe de altă parte, producerea unui cutremur cu magnitudine mai mare sau egală cu 4.0, între 6 și 9 ore, este aproximativ 20%.

O altă abordare a secvenței de cutremure din Gorj, folosind modelul de seismicitate ETAS, este prezentată în **Anexa 3** (Ghiță et al., 2023, lucrare în pregătire).

Secvența de cutremure din regiunea Gorj este și subiectul **Anexei 4** (Radulian și colaboratorii), în care este analizată intensificarea semnificativă în decursul anului 2023 a activității seismice din partea crustală a Carpaților Meridionali (zona de contact cu Podișul Getic) și din Banat (în partea de nord, Depresiunea Zarand). După cum autorii arată, această intensificare a activității seismice în partea de vest a României poate fi trasată ca începând după anul 2010. După cum autorii concluzionează, „seismicitatea de tip intraplacă înregistrată în ultimii ani în diferite zone din partea de vest a României ne-a atras atenția asupra potențialului de generare de cutremure moderate spre mari în aceste zone, după cum de altfel a și fost previzionat în lucrări anterioare (Radulian et al., 2019; Bala et al., 2020; Oros et al., 2021). Prin urmare, este necesară o reconsiderare a definiției zonelor seismogene și a parametrilor caracteristici asociați în această parte a țării și ajustarea hazardului seismic regional în acord cu noile date înregistrate.”

De asemenea, cu relevanță pentru cutremurele crustale este studiul efectuat de Borleanu și colaboratorii (**Anexa 5**), în care sunt analizate contaminările cu explozii ale catalogului cutremurelor crustale de pe teritoriul României și sunt propuse tehnici de discriminare a exploziilor și cutremurelor de pământ, pentru a îmbunătăți calitatea catalogului ROMPLUS.

În final, Poiata și colaboratorii (**Anexa 6**) propun tehnici de revizuire/omogenizare a catalogului ROMPLUS, în particular o metodologie de testarea extinsă a fluxului de estimare a magnitudinii M_L , folosind un set de date extins al cutremurelor din Vrancea și din primele zile ale secvenței de cutremure din județul Gorj. Tehnica pentru omogenizarea datelor, propusă de Zheng, Enescu, Zhuang și Yu (2021), este în momentul de față testată ca o posibilitate alternativă de omogenizare a catalogului ROMPLUS.

4. Etapa 3: Integrarea și implementarea algoritmului general de prognoza.

Prezentăm în această secțiune rezultatele legate de variația unor câmpuri geofizice, în relație cu activitatea seismică de pe teritoriul României, integrarea diverselor date într-un algoritm general de prognoza (activitatea Act 3.1), precum și planificarea și implementarea algoritmului de prognoza în platforma virtuală (activitățile 3.1 și 3.2). *De notat că rezultatele Etapei 3 nu sunt prezentate într-un raport separat (deoarece acesta nu este cerut în faza finală), ci ca parte integrantă a acestui raport final, precum și în anexele menționate.* Prezentăm pentru început rezultate legate de variația **câmpului magnetic**, ca un potențial precursor al cutremurelor de Pământ (aceste rezultate sunt prezentate pe larg în **Anexa 7** și în lucrarea Mihai et al., 2023).

Precursorii geomagnetici se referă la variațiile cu caracter anomal ale câmpului magnetic al Pământului, care apar înaintea unui cutremur și nu au o altă cauză (de exemplu o furtună magnetică) cunoscută. Deși relația dintre anomaliile geomagnetice și cutremure nu este încă pe deplin înțeleasă, unele studii sugerează că anumite perturbări ale câmpului geomagnetic sunt asociate perioadei de pregătire a unui cutremur și pot servi ca precursori ai activității seismice. Dintre anomaliile care au fost raportate ca având caracter premonitor, menționăm emisiile în banda de frecvențe ULF (frecvența ultra-joasă) și VLF (frecvența foarte joasă).

Corelările între variații ale câmpului magnetic și seismicitate s-au făcut pe datele seismice ale cutremurelor cu adâncime intermediară din zona Vrancea, între anii 2014 și 2023. Datele geomagnetice au fost înregistrate la Muntele Roșu, ca stație primară, și la Observatorul Național Geomagnetic Surlari (SUA), ca stație de referință neafectată de procesele de pregătire ale unui cutremur moderat. Am presupus că zona de manifestare efectivă a deformațiilor precursore este un cerc cu raza luată din ecuația lui Dobrovolsky (1979). Indicii geomagnetici au fost preluați de la organizațiile NOAA (SUA) și GFZ (Germania) și au fost utilizați pentru a separa variația magnetică globală, cum ar fi furtunile magnetice asociate cu activitatea solară, de eventualele anomalii seismo-electromagnetice locale, care ar putea să apară în zona de pregătire a unui cutremur vrâncean.

În plus față de câmpul geomagnetic, indicii geomagnetici și seismicitate, s-au mai studiat și variația temporală a vitezelor seismice folosind înregistrările stației MLR. Am folosit platforma Phenomenal (<https://ph.infp.ro/seismicity/data>) pentru descărcarea datelor (mai multe informații în Placinta et al, 2022), și energia seismică eliberată în timpul anomaliilor observate pe By. Eliberarea de energie seismică în zona Vrancea a fost calculată numai pentru cutremure de adâncime medie, cu $M_w > 3$. Ca metode pentru analiza datelor magnetice evidențiem metoda polarizării, metoda variației diurne și metoda vizualizării directe. Prezentăm mai jos, în Figura 9, rezultate obținute prin metoda vizualizării directe. Din această figură se constată ca:

(i) toate cutremurele s-au produs în perioade de activitate solară minimă, (ii) toate furtunile magnetice au semnături importante pe cele trei înregistrări, (iii) pe componenta EV (By) avem parte de o anomalie des întâlnită la MLR, doar că acest tip de anomalie nu apare consecvent înaintea cutremurelor, ci cum se vede și din Figura 9, uneori apare coseismic, (iv) componenta orizontală NS Bx și componenta verticală Bz au fost perturbate cu -200nT și respectiv -400nT față de media lunară în data de 16 august, într-o perioadă cu Kp minim, cu 45 de zile înaintea primului cutremur. Deoarece timpul până la cutremur este prea mare față de cel specificat în literatură, tindem să asociem această anomalie cu una datorată intervenției umane sau funcționării deficitare a digitizorului, datorată unui spike de curent.

Din toate aceste reprezentări (Figura 9 și **Anexa 7**) putem concluziona că prin metoda vizualizării directe nu au fost identificate semnale anormale, care să poată fi legate de cele trei cutremure. Rămâne însă deschisă posibilitatea de a fi existat semnale la alte frecvențe mai mari decât 0.01Hz și anume la 0.1Hz , sau chiar la 1Hz (o înregistrare pe secundă). Din păcate, digitizoarele folosite în trecut nu ne-au permis înregistrarea datelor mai des decât o dată pe minut. În prezent avem aparatură performantă care ne permite înregistrări mai dese și continuarea studiilor în diferite benzi de frecvență.

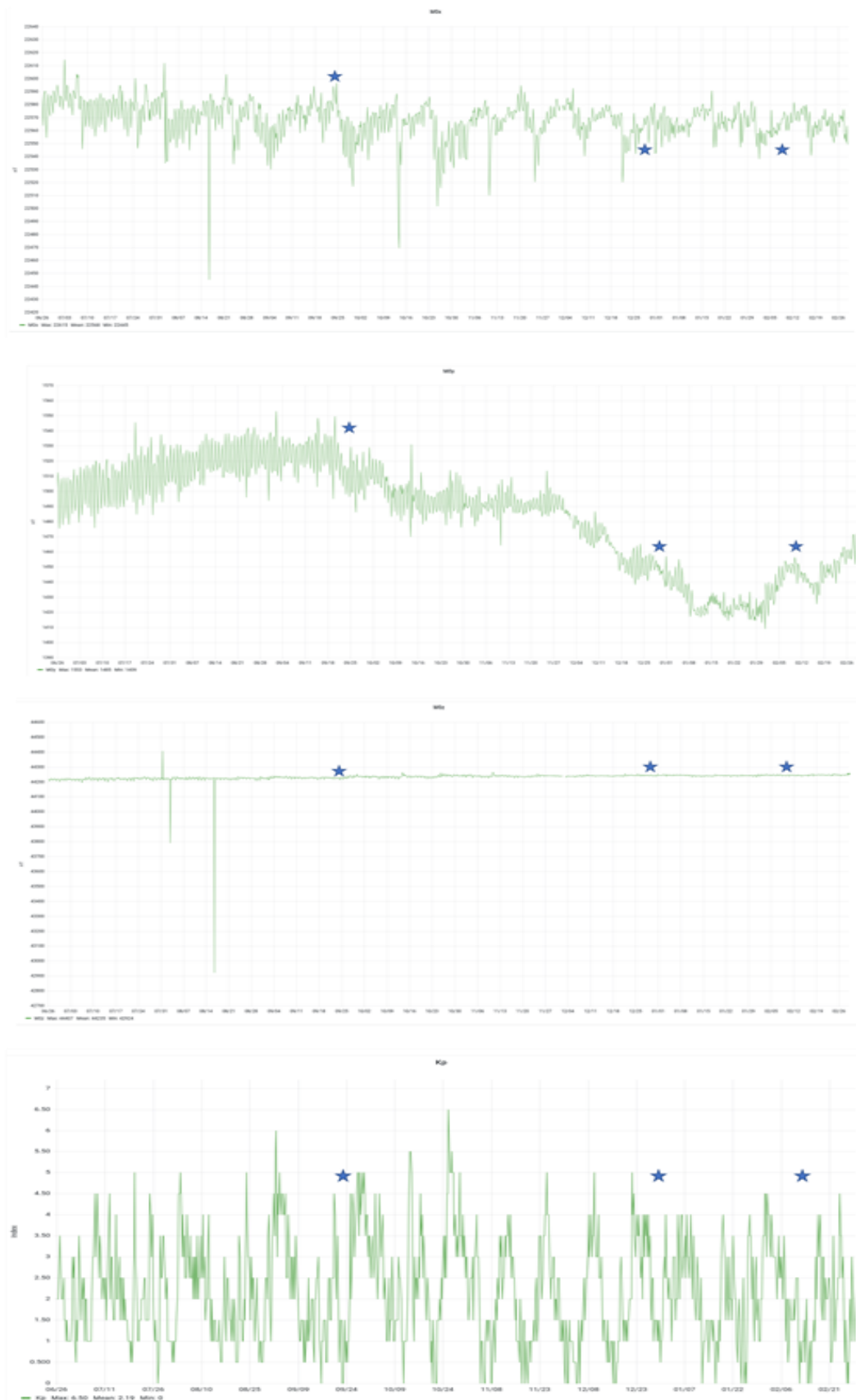


Figura 9. De sus in jos: vizualizarea datelor magnetice Bx, By si Bzz si indexul Kp, începând cu 26 iunie 2016 pana la 28 Februarie 2017. Steluțele arata cele 3 cutremure vrâncene cu magnitudini semnificative produse in aceasta perioada (vezi **Anexa 7** pentru mai multe detalii).

Am investigat de asemenea variația câmpului magnetic împreună cu energia seismică eliberată zilnic de cutremurele din Vrancea, calculată folosind formulele din **Anexa 7**. Figura 10 prezintă rezultatele.

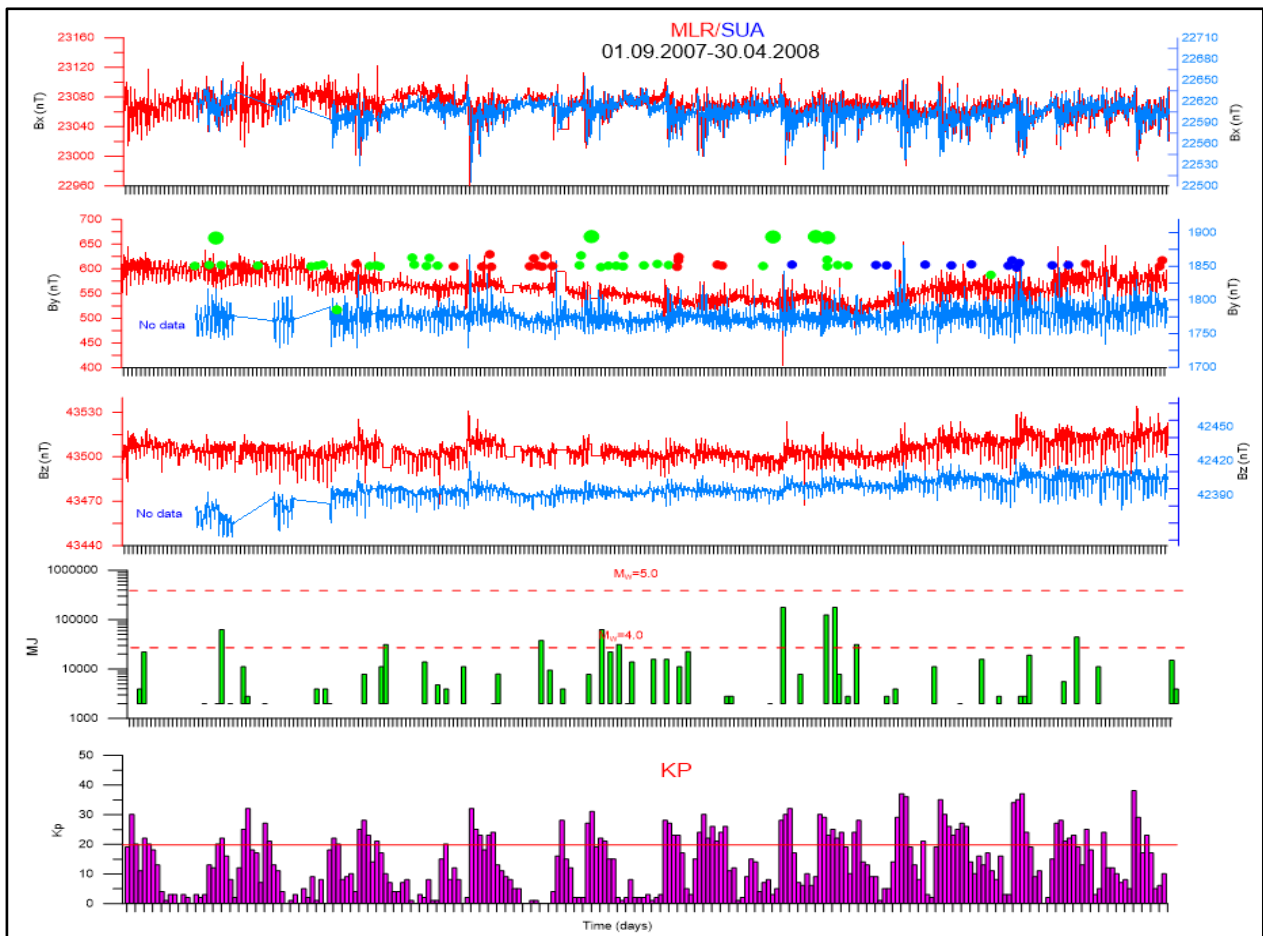


Figura 10. Reprezentarea celor trei componente ale câmpului geomagnetic (B_x , B_y , și B_z) măsurate la muntele Roșu (MLR, cu roșu) și Surlari (SUA, cu albastru). Histograma verde reprezintă energia seismică eliberată zilnic, iar în histograma mov este reprezentată suma indicilor K_p .

Se observă că magnitudinea anomaliilor geomagnetice variază de la an la an, la fel și seismicitatea. Variabilitatea măsurată pe componenta B_y a fost evidențiată prin calcularea deviației standard pentru fiecare anomalie înregistrată pe componenta orizontală B_y a câmpului geomagnetic. Activitatea solară, în special exploziile solare și ejecțiile de masă coronală (EMC), pot avea un impact semnificativ asupra câmpului geomagnetic al Pământului. O modalitate eficientă de a cuantifica aceste variații înregistrate pe componenta B_y este de a calcula deviația standard pe seturile de date geomagnetice. Această metodă a fost aplicată la stația MLR (Muntele Roșu), dar și la stația SUA (Surlari), care este utilizată ca stație de referință. Așa cum se observă în Figura 11, nu există o relație clară între valorile deviației standard măsurate pe componenta B_y la Muntele Roșu și energia seismică eliberată pe întreaga perioadă a anomaliilor. Deși valoarea maximă și minimă a deviației standard coincide cu energia minimă și maximă, nu există o proporționalitate între acestea. În mod normal, valorile deviației standard obținute la Muntele Roșu (MLR) și Surlari (SUA) ar trebui să fie similare,

fiind influențate de activitatea solara, cu valori mari pentru perioadele cu activitate solara ridicata si valori mici pentru perioadele cu activitate solara redusa. In schimb, așa cum se observa in Figura 11, aceste valori nu coincid, lucru ce indica posibila prezenta a unui factor de natura seismotectonica. Totuși nu putem elimina posibilitatea ca anomalii sezoniere înregistrate la Muntele Roșu sa fie cauzate de un "drift termic" sau sa aibă o cauza de natura antropica.

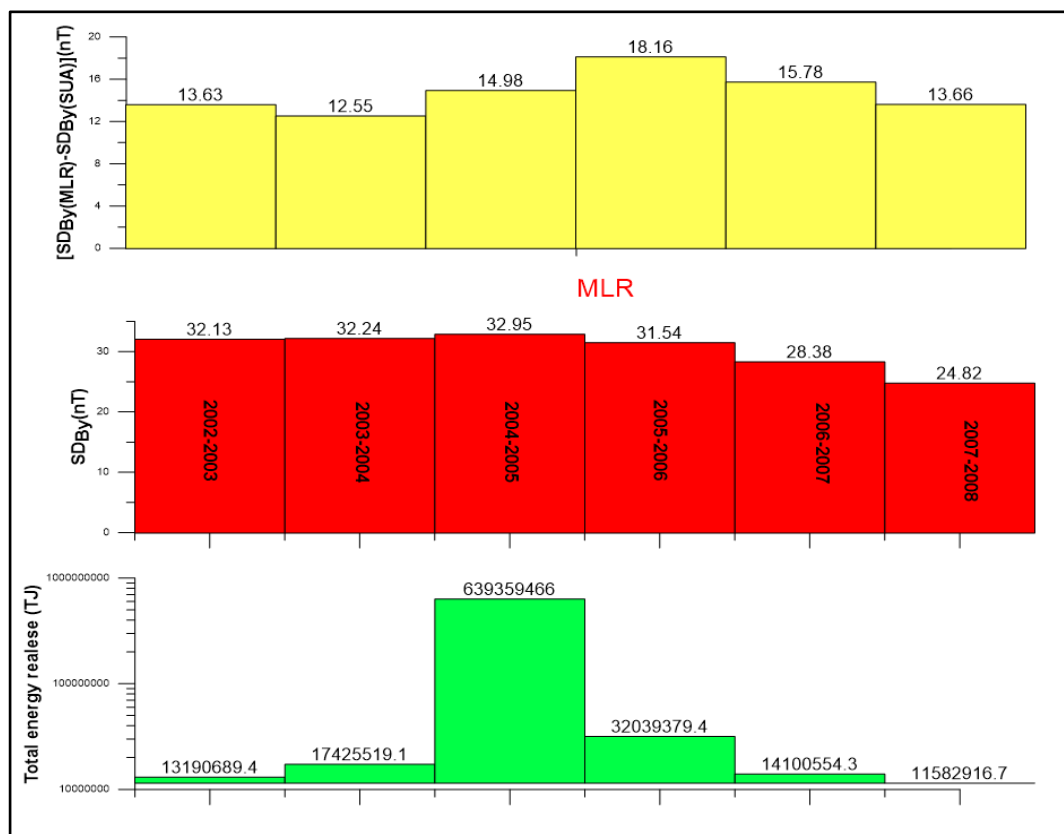


Figura. 11. Deviația standard măsurata pe componenta By la MLR (roșu) si SUA (galben) si energia seismică cumulată pentru fiecare anomalie înregistrată (verde).

Rezultatele indica clar o variabilitate mai ridicată pe componenta By măsurată la stația Muntele Roșu, dar pentru identificarea cauzei acestei variabilități, datele geomagnetice trebuie corelate intr-un mod multidisciplinar cu date meteo pentru a elimina posibila variație termică a instrumentului. Pe viitor se va aplica această metoda pe un pachet consistent de date (20 de ani) si se vor calcula indicii de corelație Pearson dintre energia seismică eliberată si mărimea valorilor abaterii standard măsurate pe componenta By a câmpului magnetic. De asemenea se vor calcula acești indicii si pentru factorii meteo: temperatura exterioara tunel, temperatura interioara tunel si umiditate tunel MLR.

Prezentam in continuare rezultate obținute din corelarea unor **parametrii geofizici ce caracterizează emisiile de gaze cu producerea cutremurelor de Pământ** (pentru mai multe detalii, de consultat **Anexa 8** si Toader et al., (2021, 2023)).

INCDFP a dezvoltat o aplicație tip Operational Earthquake Forecasting (OEF) (Toader et al., 2021) in care parametrii geofizici sunt corelați cu modificări pe termen scurt ale seismicității folosind o

relație amplitudine-frecvență. În principal rezultatele indica emisia de gaze (radon și CO₂) ca precursori seismici. Pentru seismicitate s-a considerat evoluția parametrilor „a” și „b” din legea Gutenberg–Richter (GR a-b). Am observat că o scădere pe o perioadă mai mare de 18 zile a parametrului „b” din legea Gutenberg–Richter (GR_b) este urmată de cutremure cu magnitudinea mai mare de 5R (magnitudine pe scara Richter) pentru zona Vrancea (Toader et al., 2023).

Analiza datelor presupune integrarea semnalelor și aplicarea unui algoritm STA/ LTA (Short-Term-Averages/Long-Term Averages) pe rezultat. Un exemplu pentru seismul cu magnitudinea de 5.3R din 2022/11/03, 04:50:25 UTC (zona Gura Teghii) este arătat în Figura 12, în care avem seriile de timp ale radonului și CO₂, la 3 stații aflate în zona epicentrală.

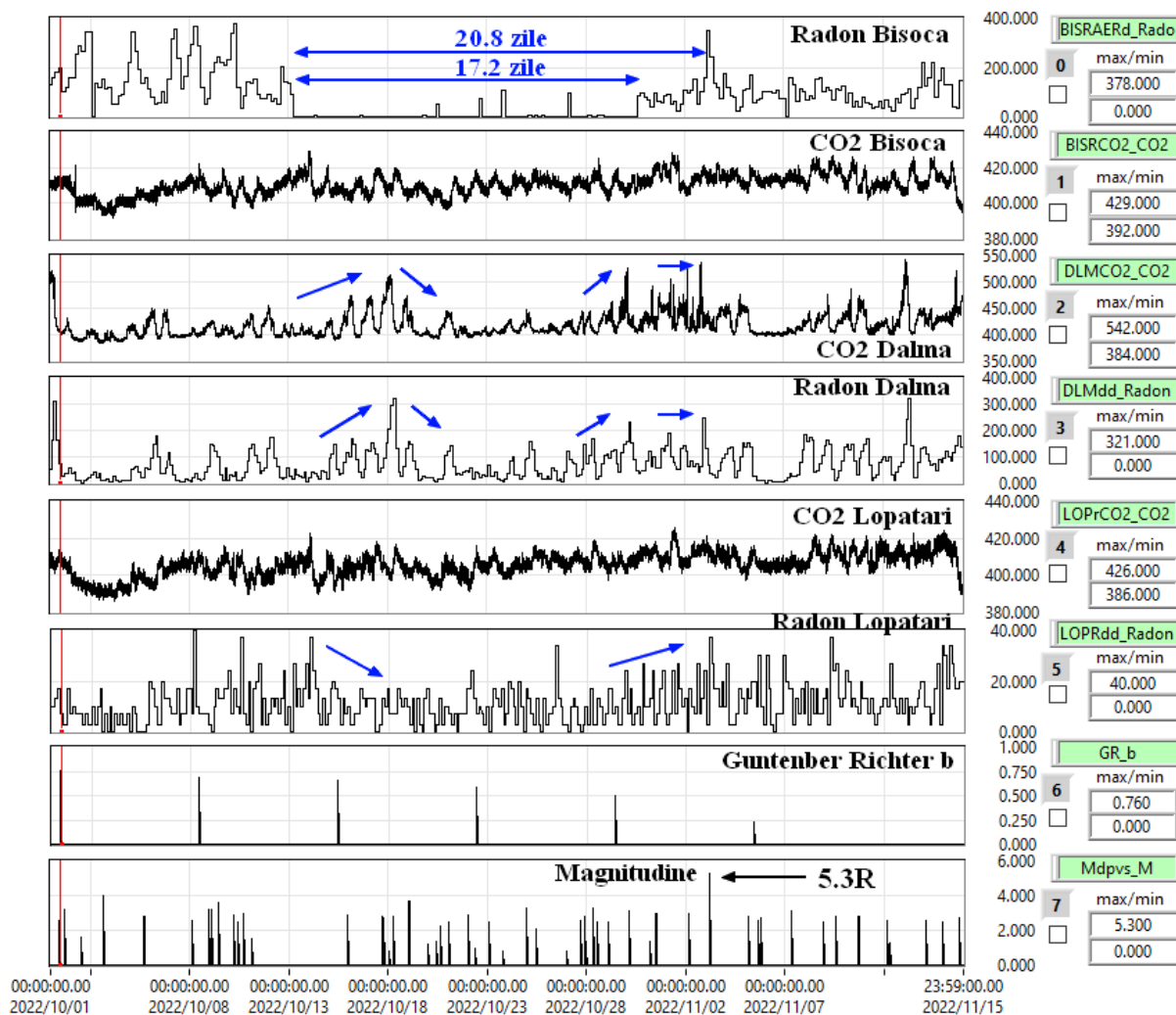


Figura 12. Serii de timp cu precursori seismici: radon, CO₂, „GR-b”, împreună cu magnitudinea cutremurelor funcție de timp, pentru un cutremur din Vrancea, magnitudine 5.3R (pe scara Richter).

O particularitate este scăderea nivelului radonului la Bisoca pe o perioadă de aproximativ 20 zile. Acest lucru se întâmplă rar și se poate explica prin deformarea terenului, în zona respectivă, care închide porii prin care se face emisia gazului. În aceeași perioadă de timp avem perturbații la Dâlma (DLM) și, mai puțin evidente, la Lopătari (LOPr), care era cea mai apropiată stație de epicentrul cutremurului. Parametru „GR_b” scade înainte de cutremur dar pentru determinarea lui este necesară

o fereastră mai mare de timp.

Prin integrarea seriilor de timp referitoare la radon și CO₂ se obține Figura 13. Și în acest caz intervalul de timp între maximum radonului de la Bisoca (BISRAER) și producerea cutremurului este de aproximativ 20 de zile. Aplicarea unui algoritmul de detecție STA / LTA (Figura 3.1.3, **Anexa 8**) indică un interval de aproximativ 12 zile.

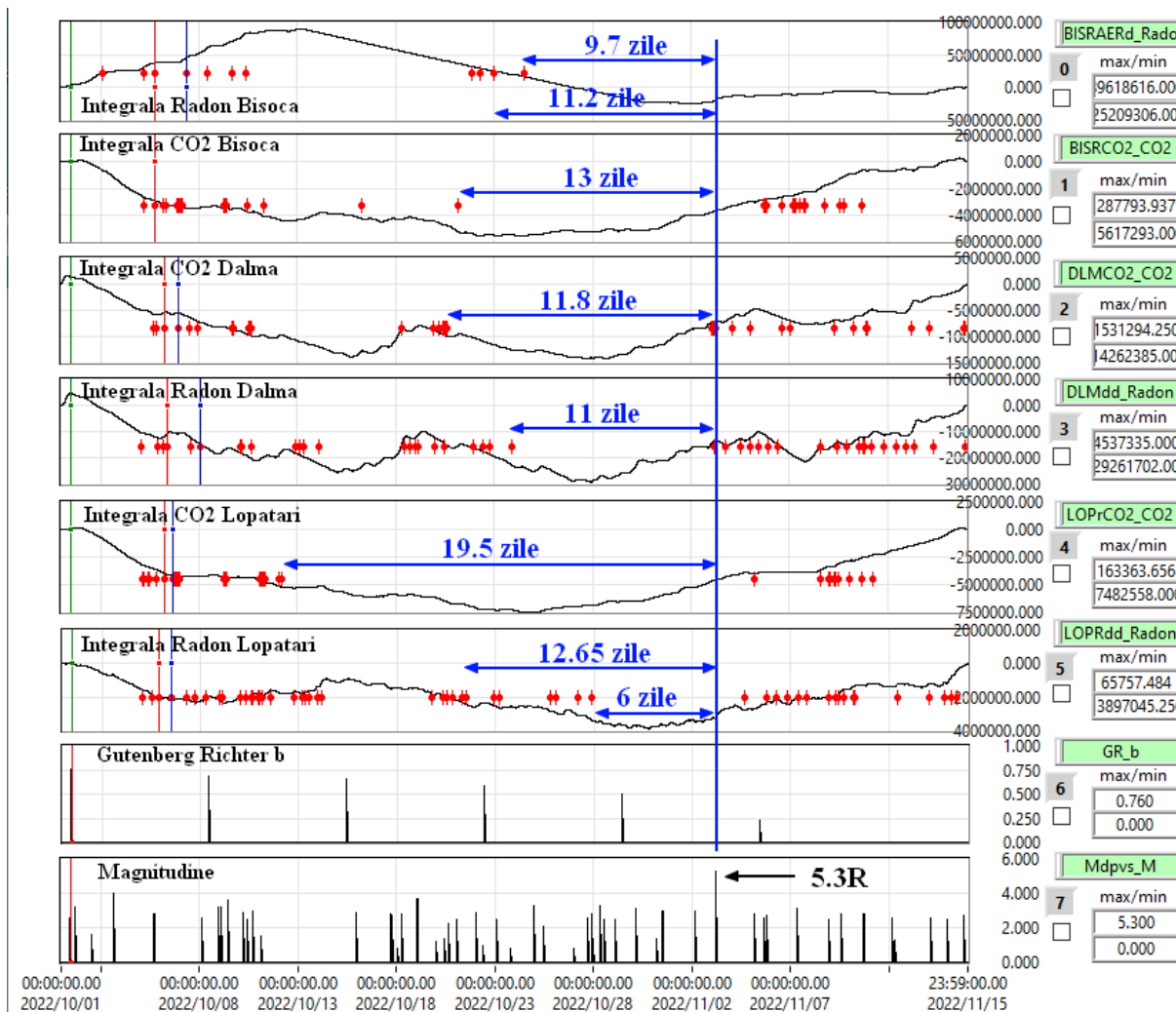


Figura 13. Cutremur Vrancea 5.3R, semnale integrate: radon, CO₂, trigger STA/LTA (puncte roșii).

Anexa 8 prezintă mai multe detalii, precum și un studiu asemănător al zonei de cutremure crustale din zona Galați.

În concluzie, monitorizarea emisiilor de gaze poate furniza prognoze pe termen scurt (de ordinul zilelor) al unor cutremure semnificative, fie din zona subcrustală din Vrancea, fie din zone cu seismicitate crustală.

Prezentăm în continuare procedurile care au stat la baza proiectării și implementării algoritmului de prognoza în platforma virtuală (activitățile 3.1 și 3.2). Diagrama din Figura 14 arată ideea generală care a stat la baza proiectării platformei. Alți parametri pentru prognoza vor fi adăugați.

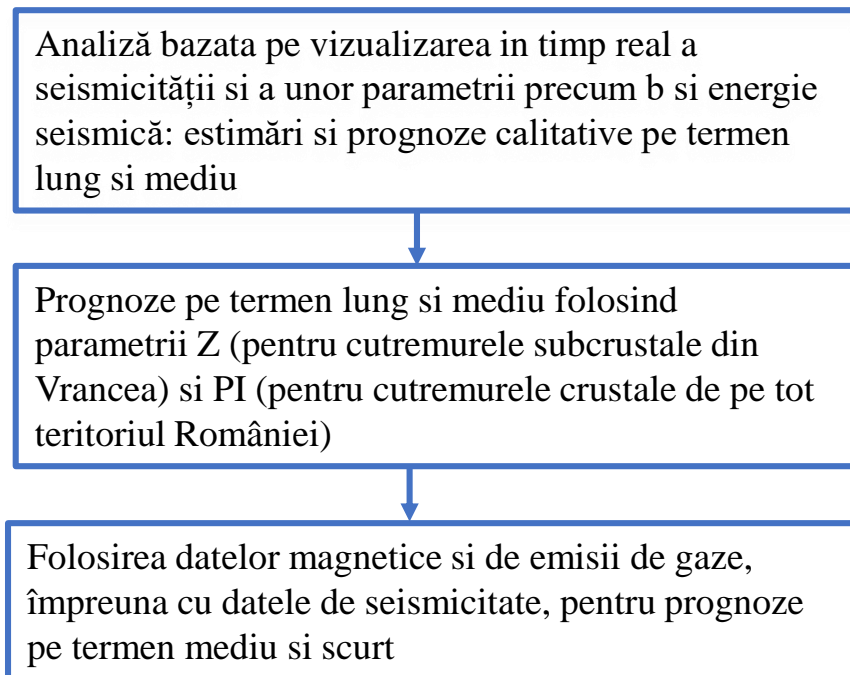


Figura 14. Proiectarea algoritmului general de prognoza al platformei verticale.

Implementarea platformei s-a realizat urmărind pașii schițați pe scurt în Figura 14. Menționăm că explicații detaliate de folosire a platformei virtuale pot fi găsite pe pagina de web a platformei, fie însoțind graficele, fie în documentația dedicată de pe web (fișier PDF). Platforma virtuală poate fi accesată din pagina de web a platformei, apăsând butonul „Platforma Virtuală” sau direct de la pagina: <http://afros.infp.ro/AFROS.php> (vezi Anexele 10 și 13)

Prima parte a platformei virtuale (butonul „**Seismicitate**”) afișează evoluția în timp și spațiu a seismicității, parametrul b (b -value) pentru seismicitatea din perimetrul geografic și gama de magnitudini și intervalul de timp selectate (selectarea are loc interactiv) și energia seismică funcție de timp. Aceste grafice realizate cu date în timp real oferă o imagine atât calitativă cât și cantitativă în ceea ce privește activitatea seismică dintr-o anumită zonă. Parametrul b (b -value) poate fi folosit ca un indicator cu caracter de prognoza al activității seismice, dat fiind că adeseori acest parametru este raportat să scadă înaintea producerii unor cutremure mari, ca urmare a creșterii/acumulării stresului tectonic (pentru mai multe detalii, vezi Enescu et al., 2001, 2023).

Parametrul Z (Z -value) pentru investigarea schimbărilor ratei seismicității cutremurelor de adâncime intermediară, subcrustale, din zona Vrancea, în funcție de timp și spațiu, este prezentat la apăsarea butonului „**Hărți Z-value**”. Sunt afișate valori ale parametrului Z în secțiuni verticale SW-NE prin zona Vrancea, pentru diferite perioade de timp. Parametrul Z poate indica perioade de activare seismică sau lacune seismice, care pot avea caracter precursor (e.g., Enescu et al., 2001). Fereastra de prognoza este de termen mediu (1 an și jumătate).

Parametrul PI pentru investigarea anomaliilor de seismicitate pentru cutremurele de adâncime superficială, crustale, de pe teritoriul României, este prezentat la apăsarea butonului „**Hărți PI RI**”. Sunt afișate valori ale parametrului PI pe teritoriul României, care indică prognoza seismică pe următorii 5 ani (perioada de termen lung).

Prezentarea în timp real a parametrilor geofizici, care caracterizează variațiile câmpului magnetic și ale emisiilor de gaze (radon și dioxid de carbon) se face prin apăsarea butonului „**Date Geofizice**”.

Aceasta pagina afișează deasemenea niște praguri pentru declararea unor „alarme” seismice, așa cum se explica în detaliu în documentația platformei.

Platforma virtuală mai conține un buton, „Diverse”, care afișează o pagină care, în momentul de față, conține unele informații legate de secvența de cutremure din Gorj.

5. Gradul de atingere a rezultatelor estimate și impactul rezultatelor obținute, cu sublinierea celui mai semnificativ rezultat obținut.

Toate obiectivele proiectului au fost realizate pe perioada celor trei etape, prin activitățile propuse în planul de realizare, rezultatele obținute fiind în concordanță cu cele planificate.

Obiectivele **Etapei 1, Proiectarea și implementarea algoritmului pentru investigarea seismicității de adâncime intermediară din zona Vrancea**, au fost realizate integral, atât prin realizarea celor două activități propuse, cât și prin atingerea rezultatelor preconizate.

Obiectivele **Etapei 2, Proiectarea și implementarea algoritmului pentru investigarea seismicității superficiale, crustale din România**, au fost realizate integral, atât prin realizarea celor două activități propuse, cât și prin atingerea rezultatelor preconizate.

Obiectivele **Etapei 3, Integrarea și implementarea algoritmului general de prognoza**, au fost realizate integral, atât prin realizarea celor trei activități propuse, cât și prin atingerea rezultatelor preconizate.

În ceea ce privește *impactul proiectului*, rezultatele studiilor efectuate în cadrul acestuia, publicate în reviste prestigioase din țară și străinătate și prezentate la întruniri internaționale, au revigorat eforturile de analiză a seismicității pe teritoriul României și reprezintă primele eforturi sistematice de prognoza a seismicității de adâncime intermediară (din zona Vrancea) și superficială pe teritoriul României. România se alătură astfel unor țări precum Statele Unite ale Americii și Japoniei, în studiul și dezvoltarea tehnicilor de prognoza seismică. Acest proiect a pus în evidență deasemenea particularitățile zonei seismice Vrancea, în contextul seismicității globale, și a creat metode noi de caracterizare a seismicității.

Considerăm ca *cel mai important rezultat* obținut este crearea platformei virtuale, care reprezintă încununarea eforturilor de cercetare ale tuturor membrilor proiectului, de-a lungul celor trei ani de activitate. Aceasta platformă va contribui la informarea corectă a publicului, în ceea ce privește prognoza seismică pe teritoriul României. Ea creează de asemenea premisele avansării cercetării în domeniul prognozei seismice, prin incorporarea, în anii care vin a unor tehnici noi, perfecționate și performante.

6. Exploatarea și diseminarea rezultatelor proiectului. Planuri de viitor.

Rezultatele proiectului au fost publicate în numeroase reviste de specialitate din țară și de peste hotare, precum și prezentate la numeroase conferințe internaționale (**Anexa 9**). Deasemenea, în timpul

secvenței de cutremure din județul Gorj, din Februarie 2023, directorul proiectului, Dr. Bogdan Enescu, precum și alți membri ai proiectului, printre care directorul general al INFP, Dr. Ionescu Constantin, Dr. Mircea Radulian și Dr. Iren-Adelina Moldovan au avut apariții în mass-media și pe alte medii sociale (e.g., Facebook, X/Twitter) prin care au oferit explicații publicului în ceea ce privește această secvență și au oferit prognoze statistice ale secvenței de replici seismice, ca parte ale eforturilor din cadrul proiectului AFROS.



Figura 15. Intervenție online, televizată, în timpul **Conferințelor EuroNews România**, având ca subiect de dezbatere cutremurele din Gorj. (Pe ecranul conferinței, Dr. Bogdan Enescu. Directorul proiectului AFROS).

Ca planuri de viitor, vom continua cu implementarea unor noi algoritmi de analiză și prognoza a seismicității. Pe data de 24 Noiembrie 2023 a avut loc o întâlnire virtuală între membri ai proiectului pentru a discuta strategii de lucru viitoare, printre care și aplicarea unor tehnici ML pentru detectarea și studiul seismicității.

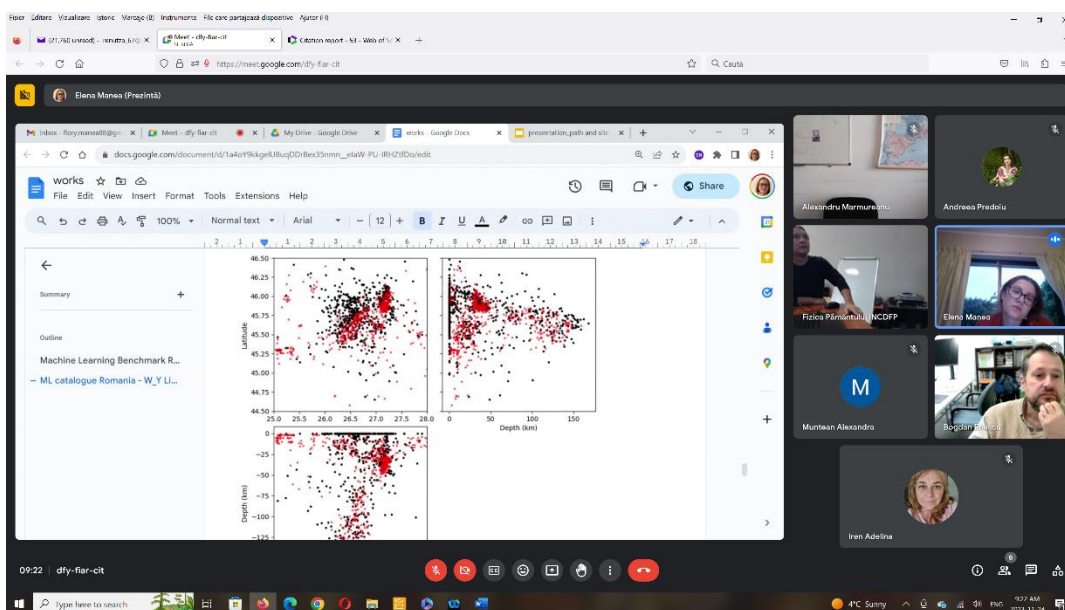


Figura 16. Întâlnire membri proiect, 24 Noiembrie 2023.

7. Prezentarea livrabilelor/indicatorilor obținuți la finalul proiectului comparativ cu cei propuși.

In planul de realizare al proiectului au fost prevăzute 3 Etape, fiecare etapa cu un număr de rezultate, si indicatori, după cum urmează:

Etapa 1. Proiectarea și implementarea algoritmului pentru investigarea seismicității de adâncime intermediară din zona Vrancea

Rezultate: „Modelarea seismicității subcrustale și algoritmi de prognoză” si „Estimarea și prognozarea parametrilor seismicității de adâncime intermediara” au fost livrate in totalitate sub forma unor algoritmi de prognoza si estimarea parametrilor de prognoza, așa cum a fost specificat in planul de realizare.

Indicatori: „Creșterea expertizei în analizarea seismicității (inclusiv însușirea unor tehnici ML) a celor 2 doctoranzi” si „Realizare pagină web” – realizați in totalitate. Cei doi doctoranzi, Alina Coman si Andrei Mihai, au beneficiat de organizarea a 5 seminare online, cu participarea unor specialiști in domeniul Seismologiei si al „Machine Learning (ML)” (detalii sunt incluse in raportul Etapei 1). Alina Coman, precum și alți membrii ai proiectului, au participat deasemenea la un curs de ML, organizat de compania ”Features Analytics” (Belgia), participarea lor fiind cofinanțata de proiectul AFROS. Proiectul a avut 4 lucrări publicate ISI si 2 in evaluare in reviste indexate in baze de date internaționale. Au fost 8 participări la conferințe.

Etapa 2: Proiectarea si implementarea algoritmului pentru investigarea seismicității superficiale, crustale din România

Rezultate: „Modelarea seismicității subcrustale și algoritmi de prognoză” si „Estimarea și prognozarea parametrilor seismicității superficiale, crustale” au fost livrate in totalitate sub forma unor algoritmi de prognoza si estimarea parametrilor de prognoza, așa cum a fost specificat in planul de realizare.

Indicatori: „Creșterea expertizei în analizarea seismicității a celor 2 doctoranzi”, „2 lucrări ISI și 2 prezentări conferințe” si „Actualizare pagină web” – realizați in totalitate. In timpul celui de-al doilea an de desfășurare a proiectului am organizat 4 seminare online având ca scop instruirea celor 2 doctoranzi si, in general, a cercetătorilor tineri (detalii sunt incluse in raportul Etapei 2). Proiectul a avut 2 lucrări publicate ISI, cu alte 2 fiind acceptate, 3 in evaluare si 8 capitole carte. Au fost 16 prezentări la conferințe.

Etapa 3: Integrarea si implementarea algoritmului general de prognoza

Rezultate: „Corelații între observațiile geofizice și seismicitate”, „Proiectarea platformei pentru vizualizarea datelor și detectarea eventualelor anomalii” si „Implementarea platformei” au fost livrate in totalitate.

Indicatori: „2 lucrări ISI și 2 prezentări conferințe”; „pliante explicative”, „pagina web adusa la zi” – realizați in totalitate. Proiectul a avut 10 articole ISI publicate, cu alte 6 articole fiind in evaluare si un capitol carte. Deasemenea, 4 articole au fost publicate in reviste indexate in baze de date internaționale. Au fost 22 participări la conferințe. Am realizat deasemenea pliante/flyers explicative. Precizam ca platforma virtuala, care se găsește pe pagina proiectului, a fost testata de utilizatori, așa după cum se poate constata in **Anexa 10**.

In tabelele de la sfârșitul **Anexei 9** sunt prezentați organizat indicatorii pentru toate cele 3 etape ale proiectului (36 de luni).

Din cele indicate mai sus si din tabelele din **Anexa 9, cu indicatorii de rezultat ai proiectului, se vede ca toate valorile propuse au fost realizate si chiar depășite cu mult. De menționat ca mai mult de jumătate din articolele publicate sunt publicate in reviste ISI in Q1 si Q2 (după IF si/sau AIS).**

Legat de cei doi cercetători doctoranzi, dorim sa precizam câteva detalii.

Primul dintre ei, Alina Coman, înscrisa la doctorat la Universitatea din București, Facultatea de Fizica, cu titlul tezei de doctorat „Dezvoltare de modele de viteze seismice pentru teritoriul României”, este intr-un stadiu al studiilor avansat, susținându-și prezentarea tezei in catedra. Este preconizat ca pana la sfârșitul anului sa fie planificata si susținerea publica a tezei.

Cel de-al doilea doctorand, Andrei Mihai, înscris la doctorat la Universitatea din București, Facultatea de Fizica, cu titlul tezei de doctorat „Cercetări privind corelarea comportamentului câmpului magnetic local cu seismicitatea din zona Vrancea”, este deasemenea intr-un stadiu avansat, susținându-și toate examenele si referatele in catedra si publicând numărul cerut de articole. In momentul de fata acesta elaborează varianta finala a tezei. **Amândoi studenții doctoranzi si-au realizat activitățile de doctorat in cadrul proiectului AFROS, cu coordonarea si îndrumarea personalului AFROS.**

Data

Decembrie 6, 2023

Director de Proiect

Enescu Bogdan Dumitru

