RAPORTARE ȘTIINȚIFICĂ

PROIECT

Analiza și prognoza seismicității României
(Analysis and Forecasting of ROmanian Seismicity)
AFROS

Cod Proiect: PN-III-P4-ID-PCE- 2020-1361
Contract: PCE 119/2021

RST - RAPORT ȘTIINȚIFIC ȘI TEHNIC ÎN EXTENSO

ETAPA I – Etapă intermediară

Proiectarea și implementarea algoritmului pentru investigarea seismicității de adâncime intermediară din zona Vrancea
04.01.2021 - 31.12.2021

Tip Inreg.	Denumire Etapă, Denumire Activitate	Tip act	Rezultate	Dată Raportare
Etapa 1	Proiectarea și implementarea algoritmului pentru investigarea seismicității de adâncime intermediară din zona Vrancea	-	• Creșterea expertizei în analizarea seismicității (inclusiv însușirea unor tehnici ML) a celor 2 doctoranzi – raport de instruire; • Publicare articole ISI, BDI • Prezentări conferințe; realizare pagină web	31/12/2021
Act 1.1	**Denumire Activitate:** Selecția algoritmului de prognoză, descrierea și proiectarea software-ului	A1	• Modelarea seismicității subcrustale și algoritmi de prognoză - raport de cercetare;	31/12/2021
Act 1.2	**Denumire Activitate:** Aplicarea, testarea și calibrarea algoritmilor de prognoză	A1	• Estimarea și prognozarea parametrilor seismicității de adâncime intermediara – raport de cercetare;	31/12/2021

*A1 - Cercetare fundamentala

CUPRINS

Rezumatul Etapei

1. Introducere

2. Descriere ştiinţifica şi tehnică a etapei

Activitatea A1.1 Selecția algoritmului de prognoză, descrierea și proiectarea software-ului

Activitatea A1.2 Aplicarea, testarea și calibrarea algoritmilor de prognoză

3. Concluzii, cu evidențierea a ceea ce s-a realizat din obiectivele propuse

4. Bibliografie

5. Rezultatele etapei

- Modelarea seismicității subcrustale și algoritmi de prognoză - raport de cercetare;
- Estimarea și prognozarea parametrilor seismicității de adâncime intermediara – raport de cercetare;
- Creșterea expertizei în analizarea seismicității (inclusiv însușirea unor tehnici ML) a celor 2 doctoranzi – raport de instruire;

6. Modul de diseminare a rezultatelor

- Publicare articole ISI, BDI
- Prezentări conferințe
- Realizare pagină web

Rezumatul Etapei

Prima etapă a proiectului AFROS a avut ca obiectiv principal analiza seismicității subcrustale din zona Vrancea și selectarea, aplicarea, testarea și calibrarea unor algoritmi de prognoză a seismicității. Așa după cum este descris în detaliu în Capitolul 2, am analizat activitatea seismică subcrustală din zona Vrancea, funcție de timp și spațiu, am determinat magnitudinea de completitudine a cutremurelor subcrustale din catalogul seismic ROMPLUS (catalogul oficial at Institutului Național de Fizica Pământului (INFP), care acoperă tot teritoriul României) și am investigat schimbările de frecvenţă (rata) a seismicității subcrustale (parametrul z), precum și a raportului cutremurelor mari relativ la cutremurele mici (parametrul b din relația frecvenţă-magnitudine) în funcție de timp.

Analiza efectuată a stat la baza elaborării unei metodologii pentru prognoza seismicității de adâncime intermediară din zona Vrancea. Procedura principală adoptată constă în 1) împărțirea zonei de studiu folosind o grilă (grid) în două dimensiuni (distanța de-a lungul unui profil vertical orientat SW-NE şi adâncimea), cu un interval de 5 km între două noduri succesive ale grilei; 2) pentru fiecare nod al grilei, calcularea parametrului statistic z, care poate detecta schimbări în rata seismicității între două perioade de timp; 3) definirea celor două ferestre: o fereastră de "background", aleasă aici între începutul catalogului și momentul la care se face calculul și o fereastră de monitorizare, care se extinde în continuare, pentru 1,5 ani; 4) rezultatul calculului este înnoit la fiecare 28 de zile. Am definit un nivel de "alarmă" pentru $|z| \geq 5$, bazat pe studii anterioare, în alte zone seismice ale lumii. Bazat pe această procedură, am detectat o lacună seismică (perioadă de relativă liniște seismică) la adâncimi între 150 – 160 km. Deoarece, bazat pe studii anterioare pentru seismicitatea vrânceană, o lacună seismică precursoare poate dura câțiva ani înainte de producerea unui cutremur major, considerăm că fereastra de 1,5 ani poate surprinde adecvat schimbări pe termen lung ale seismicității, cu eventual caracter precursor. Metoda descrisă pe scurt mai sus este continuu calibrată, pe măsura acumulării de noi date. Deasemenea, folosim date din trecut (de exemplu, de dinainte de cutremurul de magnitudine M7.2, din 4 Martie 1977), pentru a testa metoda retroactiv.

Pe lângă analiza parametrului z, parametrul b este continuu monitorizat, funcție de timp sau spațiu-timp, folosind aceeași grila descrisă mai sus. Pentru momentul de față, o valoare a parametrului b mai mică decât 1.0, pentru o anumită fereastră de timp, este folosită pentru a semnala o schimbare semnificativă de seismicitate, din punct de vedere statistic: o creștere a numărului cutremurelor relativ largi în comparație cu cele de magnitudini mici, care poate avea caracter precursor.

Identificarea lacunei seismice în domeniul profund subcrustal, a necesitat o analiză atentă a unor posibile cauze artificiale care ar fi putut să inducă această schimbare. Analiza a arătat că, foarte probabil, lacuna seismică din domeniul profund este legată de probleme de localizare a cutremurelor din acest interval de adâncime. În momentul de față, lucrăm la rezolvarea deficiențelor semnalate în catalog privind localizarea și neomogenitatea scării de magnitudine, care ar putea afecta distribuția pe adâncime a hipocentrelor și estimarea parametrului b.

Un rezultat important obținut este identificarea unei descreșteri a parametrului b în funcție de adâncime. Acest rezultat poate sugera că următorul cutremur vrâncean puternic va avea loc în zona adâncă. Acest rezultat este testat în continuare.

Printre contribuțiile inovative ale acestui prim an de activitate, menționăm folosirea unor algoritmi ML pentru analiza grupării seismicității în spațiu și dezvoltarea unei metode noi pentru analiza corelărilor spațiu-timp-energie ale seismicității și detectarea secvențelor de pre-șocuri sau replici seismice.

Pe lângă activitățile de cercetare științifică, am organizat, în cadrul proiectului, seminarii şi lecții de instruire cu participarea membrilor proiectului, inclusiv a studenților doctoranzi.

1. Introducere

Proiectul AFROS își propune să analizeze seismicitatea vrânceană şi să găsească elemente cu posibil caracter predictiv, care să fie folosite în scopul dezvoltării şi adaptării unor tehnici de prognoză (”forecasting”) pentru teritoriul României. Un scop indirect al proiectului este să construiască baza de date necesară analizei și prognozei cutremurelor de pe teritoriul României. In raportul de față, vom prezenta studiile efectuate în primul an al proiectul (Etapa 1), în cadrul a două activități distincte, în ceea ce privește seismicitatea de adâncime intermediară din zona Vrancea.

Zona seismică Vrancea este situată la curbura Carpaților Orientali din România și se caracterizează printr-o seismicitate persistentă și bine delimitată. Epicentrele cutremurelor din Vrancea sunt situate în interiorul unui arii dreptunghiulare având colțurile, aproximativ, între latitudinile 44,90 - 46,50 și longitudinile între 25,50 - 28,00. Adâncimea hipocentrală a evenimentelor variază între 0 la 220 km, dar activitatea seismică principală are loc la adâncime intermediară (60 - 180 km) (de exemplu, Oncescu și colab., 1999).

Cel mai mare cutremur cunoscut, de adâncime intermediară, din zona Vrancea a avut loc la data de 26 octombrie 1802 și a avut o magnitudine-moment, Mw, estimată la 7,9 (Georgescu, 2004). Activitatea seismică crustală în regiunea Vrancea este relativ scăzută, cu magnitudini maxime în intervalul 5,0 - 5,5 (Radu, 1979; Moldovan și colab., 2008).

Numeroase studii au fost dedicate cercetării seismicității zonei Vrancea. Unele dintre ele au analizat, din punct de vedere statistic, modelele de recurență a cutremurelor majore de adâncime intermediară (Mw ≥ 6,5) (de exemplu, Enescu și colab., 1974; Enescu și Enescu, 1996; Hurukawa și colab., 2008). Alte studii s-au ocupat de recunoașterea unor potențiale modele precursoare de seismicitate pentru cutremurele puternice din Vrancea (de exemplu, Mârza, 1979; Radulian și Trifu, 1991; Enescu și Ito, 1999; Hurukawa și Imoto, 2010). Mârza (1979) a raportat existenta unei lacune seismice precursoare (care a durat câțiva ani) înainte de producerea cutremurului vrâncean de magnitudine 7,2, din 4 Martie 1977.

2. Descriere științifică şi tehnică a etapei

Activitatea A1.1. Selecția algoritmului de prognoză, descrierea și proiectarea software-ului

Această secțiune prezintă rezultatele obținute privind distribuția spațială şi temporală a activității seismice de adâncime intermediară din zona Vrancea, cu accent pe caracteristicile ei remarcabile care pot fi folosite pentru prognoză seismică. Principalul scop al acestei analize este să ofere informația necesară pentru selecția algoritmilor de prognoză cei mai adecvați şi proiectarea lor în concordanță cu caracteristicile datelor seismice.

Prezentăm mai întâi unele caracteristici generale ale seismicității României. Apoi introducem metodele folosite pentru o analiză mai detaliată. În cadrul analizei detaliate, vom prezenta la început rezultatele obținute folosind doi algoritmi diferiți pentru gruparea seismicității subcrustale din Vrancea, în trei dimensiuni (latitudine, longitudine și adâncime). Aplicarea celor doi algoritmi menționați oferă prilejul de a utiliza tehnici de tip “machine-learning (ML)” pentru analiza seismicității. Vom discuta apoi relația frecvență-magnitudine pentru cutremurele vrâncene subcrustale și particularitățile acesteia în funcție de adâncime. Pentru a studia schimbările ratei seismicității, introducem parametrul statistic z, care poate detecta perioade de lacună seismică sau intensificare a seismicității.

Secțiunea descrie deasemenea metodologia și software-ul folosite în analiza datelor. Ultima parte a acestei secțiuni descrie proiectarea algoritmului folosit pentru prognoza seismică.

Caracteristici generale ale seismicității României

Figura 1 prezintă seismicitatea României între anii 984 – 2021, conform catalogului ROMPLUS (Oncescu et al., 1999 - actualizat). Pentru perioadele istorice (înainte de anul 1940), informațiile se referă cu precădere la cutremurele majore, cu magnitudini mai mari de 6,5 (locațiile acestor cutremure istorice, bazate pe date macro-seismice, au incertitudini relativ mari, în special în ceea ce privește adâncimea

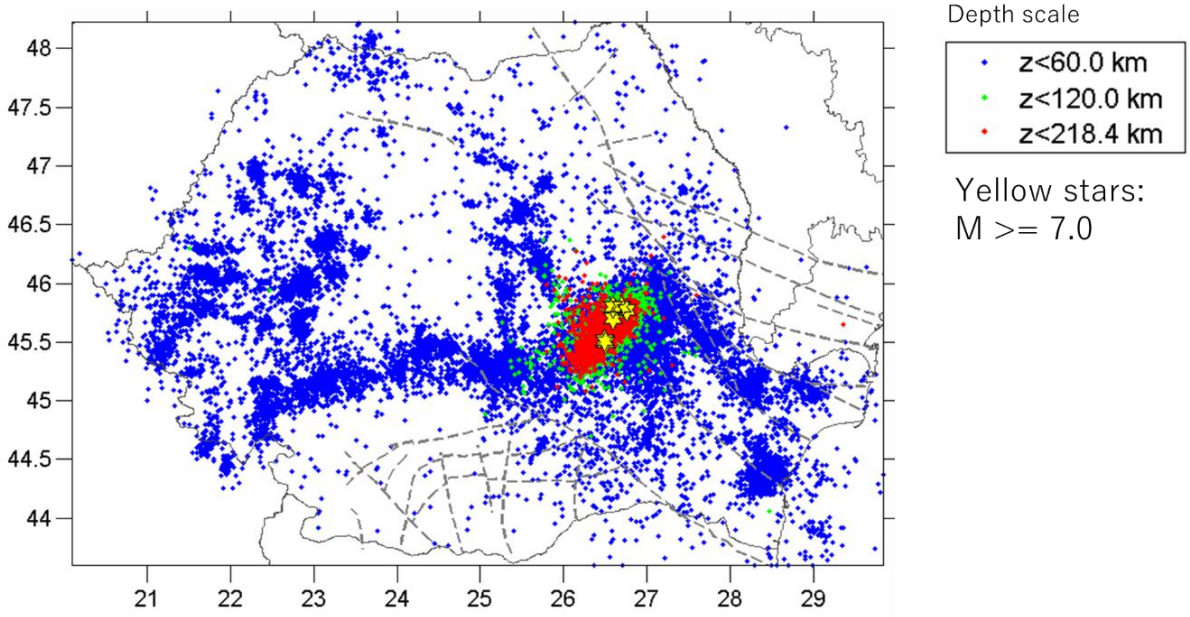


Figura 1. Hartă reprezentând seismicitatea de pe teritoriul României, între anii 984 şi 2021, conform catalogului ROMPLUS (Oncescu et al., 1999). Faliile majore, litosferice (e.g., Dinu și Răileanu, 2008), sunt reprezentate prin linii punctate. Epicentrele cutremurelor sunt reprezentate prin puncte de culoare albastră (cutremure cu adâncimi mai mici de 60 km), verde (cutremure cu adâncimi între 60 și 120 km) și roșie (cutremurele cu adâncimi mai mari de 120 km). Intervalele de adâncime au fost selectate astfel încât fiecare dintre ele sa se extindă pe aproximativ o treime din adâncimea maximă (aproximativ 220 km).

focarului seismic). Seismicitatea din segmentul superficial (0 – 60 km) este crustală, în timp ce pentru adâncimi mai mari de 60 km, cutremurele sunt considerate de adâncime intermediară, având loc în segmentul de litosferă subdus la curbura Carpaților, în zona Vrancea. Prezentul raport se referă în special la cutremurele de adâncime intermediară, cu adâncimi între 60 şi 180 km.

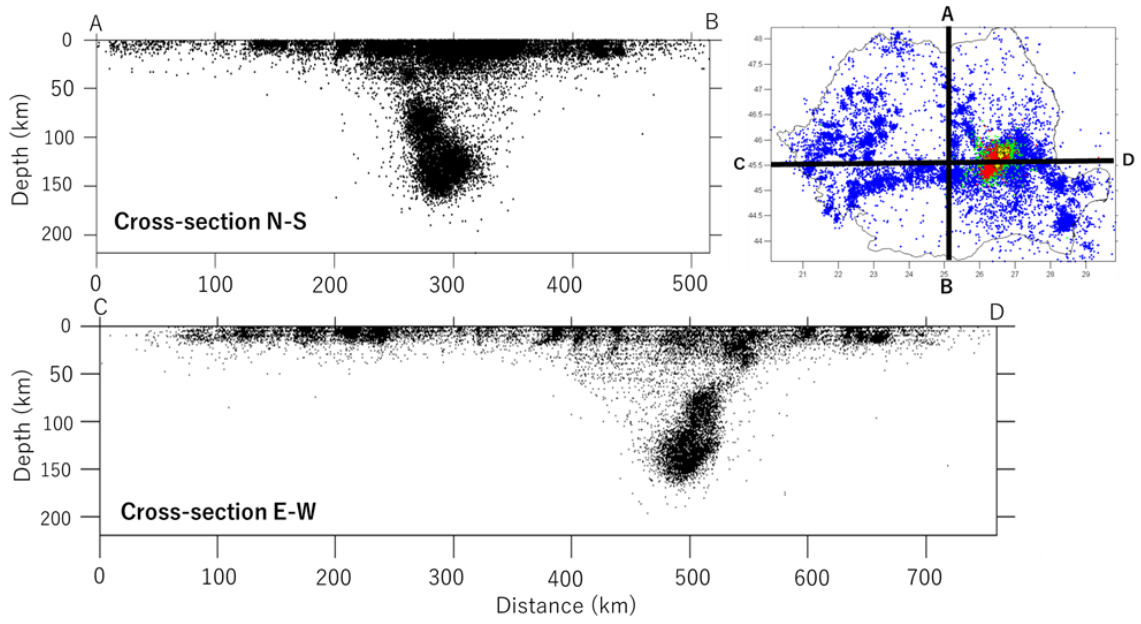


Figura 2. Secțiuni transversale (distantă – adâncime) (sus: N – S și jos: E – V) ale seismicității de pe teritoriul României (984 – 2021). Secțiunea A – B (orientata N – S) și cea C – D (orientata E – V) sunt arătate pe harta din aceeași figură (dreapta-sus).

Așa după cum se observă în Figura 2, seismicitatea crustală (adâncime mai mica de 60 km) se extinde pe tot teritoriul României, în zone seismice specifice, precum regiunile Câmpulung, Banat sau Făgăraș, în timp ce seismicitatea de adâncime intermediară (adâncimi ale focarelor seismice între 60 și 180 km) este restrânsa la zona seismică Vrancea. Din cele două secțiuni transversale se poate observa că regiunea seismică de adâncime intermediară din zona Vrancea este orientată NE – SW.

Histograma distribuției seismicității subcrustale din Vrancea, funcție de adâncime (Figura 3), pune în evidență existența a 2 grupuri distincte de cutremure: superficiale (crustale), cu adâncimi până în ~40-50 km și de adâncime intermediară, cu adâncimi între ~60 și 180 km. Pentru cutremurele de adâncime intermediară se observă o distribuție bi-modală, cu o prima concentrare relativ modestă de seismicitate între aproximativ 60 și 100 km și o alta între aproximativ 100 și 180 km. Seismicitatea vrânceană de adâncime superficială (crustală) și intermediară sunt separate de un "gap seismic" (o zonă caracterizată de lipsa relativă a evenimentelor seismice) între aproximativ 40/50 și 60 km adâncime.

Distribuția neomogenă a cutremurelor în funcție de adâncime sugerează, pentru prognoză, fie o analiză care să adreseze diversele niveluri de adâncimi separat sau o metodologie care sa abordeze schimbarea valorilor parametrilor de seismicitate în funcție de timp și adâncime.

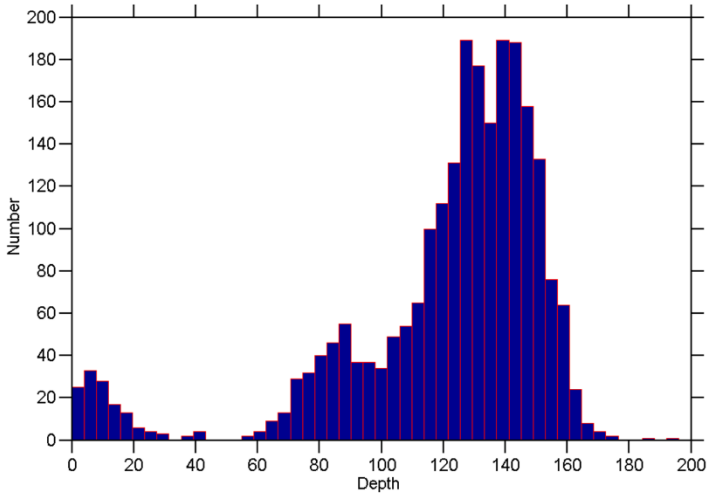


Figura 3. Histograma seismicității României în funcție de adâncime, pentru catalogul ROMPLUS, M ≥ 3,0, între anii 2000 și 2021.

Reprezentarea cutremurelor cu adâncimi intermediare din Vrancea în 3D (latitudine, longitudine, adâncime) (Figura 4) permite separarea vizuală a seismicității între un cluster (grupare) de adâncime relativ mică (situat aproximativ între 60 și 100/120 km) și un cluster relativ adânc (profund), caracterizat de seismicitate mai abundentă (100/120 – 180 km).

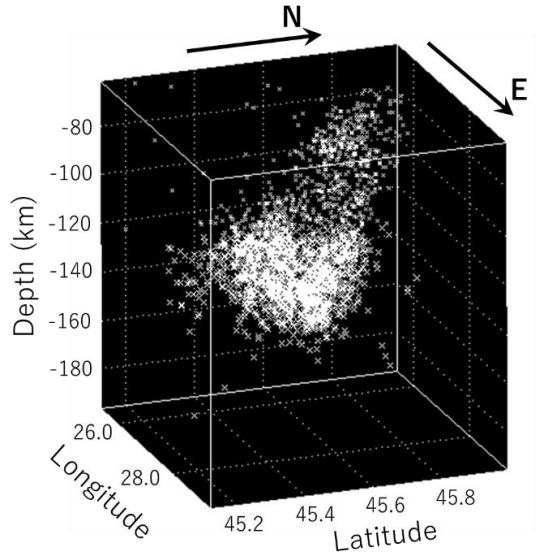


Figura 4. Grafic 3D al cutremurelor de adâncime intermediară din Vrancea (M ≥ 3,0, 2000 – 2021), reprezentate prin x-uri de culoare albă.

Metode de analiză detaliată

După prezentarea succintă a caracteristicilor generale ale activității seismice de pe teritoriul României, în special a cutremurelor de adâncime intermediară (60 – 180 km) vrâncene, descriem în cele ce urmează metodele folosite pentru investigația în detaliu a seismicității, în funcție de timp și spațiu. Aceste metode formează deasemenea nucleul strategiei de prognozare implementată în cadrul proiectului.

(1) Algoritmi de grupare a datelor

Au fost aplicați doi algoritmi de grupare a datelor pentru a înțelege, în mod obiectiv, distribuția seismicității subcrustale vrâncene. *Acești algoritmi nu fac în momentul de față parte a strategiei de prognozare a seismicității, dar vor fi considerați în activitățile viitoare.*

(a) K-means este un algoritm de partiționare a datelor, mai precis de învățare automată nesupravegheată care separă iterativ clusterele convexe prin minimizarea distanței pătrate medii dintre punctele clusterului. Algoritmul funcționează pe baza unui set de parametri predefiniți, cum ar fi un număr maxim de clustere și/sau un număr maxim de puncte de date în fiecare cluster (Lloyd, 1982; Arthur și Vassilvitskii, 2006).

(b) DBSCAN, semnifică, în limba engleză, "Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise" (Ester și colab., 1996; Schubert și colab., 2017). Acest algoritm găsește puncte în regiunile de date cele mai dense și extinde clusterele din acestea. În general, este potrivit pentru date care cuprind clustere cu densități asemănătoare. *Ambii algoritmi sunt rulați folosind pachetul scikit-learn (Pedregosa și colab., 2011), limbajul de programare Python.*

(2) Analiza frecvenţă-magnitudine a cutremurelor

Unul dintre cei mai studiați parametri de seismicitate este parametrul b din relația $\log N = a - bM$ (1) (Gutenberg și Richter, 1944), unde a și b sunt constante (care urmează sa fie determinate prin fitarea datelor), și N este numărul cumulativ sau non-cumulativ de cutremure cu magnitudini mai mari sau egale cu M. Parametrul b reflectă proporția relativă dintre cutremurele de magnitudini mari și mici din zona de studiu.

Pentru a determina parametrii a și b, datele frecvenţă-magnitudine a cutremurelor sunt fitate cu metoda "maximum likelihood" (Aki, 1965), care oferă o estimare robustă a parametrilor (în detaliu, estimarea nu este afectată semnificativ de existenţa valorilor aberante ("outliers")). Metoda oferă şi intervalele de incertitudine ale parametrilor. Fitarea datelor este făcută pentru cutremure de magnitudini mai mari sau egale cu magnitudinea de completitudine a datelor, Mc, determinată prin metoda "curburii maxime" (Wiemer și Wyss, 2000). Magnitudinea de completitudine este magnitudinea minimă pentru care toate cutremurele sunt reprezentate complet în catalogul seismic (sau în eșantionul de date). *Toate calculele sunt efectuate în limbajul MATLAB.*

O descreștere a valorii parametrului b este deseori menționată ca fenomen precursor înaintea unor cutremure majore (e.g., cutremurul din localitatea Kobe, Japonia, cu magnitudinea M7,3, produs în 1995 - Enescu și Ito, 2001). *De aceea, variația parametrului b în funcție de timp și spațiu este monitorizată, cu scop de prognoză, în cadrul acestui proiect.*

(3) Parametrul z pentru identificarea schimbărilor ratei de seismicitate (Habermann, 1983) este dat de formula:

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

unde,

- m_1 și m_2 reprezintă media ratei de cutremure pentru 2 perioade (W_1 și W_2) pe care dorim sa le comparam;

- n_1, n_2 și σ_1, σ_2 sunt, respectiv, numerele de cutremure şi deviațiile standard pentru cele 2 perioade de timp.

Valorile parametrului z au aceeași interpretare în termeni ai semnificației statistice precum numărul de deviații standard de la valoarea medie pentru o distribuție normală. Astfel, o valoare $|z| \geq 1,96$ arată o semnificație a schimbării ratei seismice de 95%, în timp ce $|z| \geq 2,58$ indică o semnificație statistică cu un nivel de încredere de 99%. O valoare pozitivă a parametrului z reprezintă o seismicitate relativ scăzută în fereastra W_2 comparat cu W_1, în timp ce o valoare negativă reprezintă o activare a seismicității în fereastra W_2 comparat cu W_1. Fereastra W_1 va fi definita, în cadrul acestui proiect, de la începutul catalogului pana la momentul de la care începe fereastra W_2. Fereastra W_2 se extinde de la momentul pentru care se determină parametrul z și are o lungime definită de utilizator (de exemplu, un an de zile, etc...), în funcție de scopul urmărit. Denumim fereastra W_2 fereastră de monitorizare.

Legat de semnificația statistică a lui z, diferiți autori propun limite mai conservatoare, bazate pe simularea unor cataloage de cutremure aleatorii cu caracteristici asemănătoare cu catalogul real analizat (e.g., Katsumata, 2017 au folosit $|z| \geq 5,0$). Enescu și Ito (2001) au detectat o perioadă de relativă liniște seismică înainte de cutremurul din anul 1995 din localitatea Kobe (cu magnitudine M7,3) pe baza unei valori anomale a lui z = 10,4 (valoarea cea mai mare pentru întreaga perioadă acoperită de catalogul analizat). *Parametrul z va fi folosit în scop de prognoză în cadrul acestui proiect. Toți algoritmii de calcul sunt implementați în limbajul MATLAB.*

Rezultate analiză detaliată

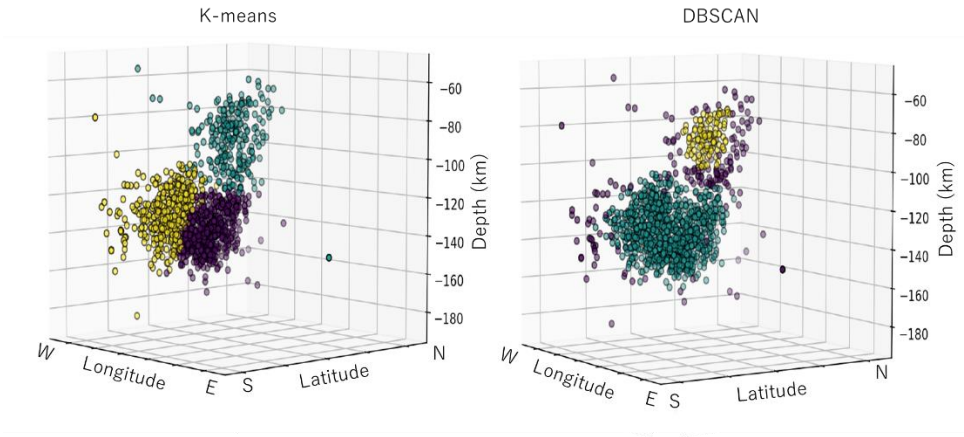


Figura 5. Reprezentare 3D (latitudine, longitudine, adâncime) a cutremurelor intermediare din Vrancea. Culorile diferite reprezintă grupări de cutremure (clustere) diferite, folosind doi algoritmi diferiți: K-means (stânga) și DBSCAN (dreapta).

În domeniul subcrustal, în cazul selectării cutremurelor cu $M \geq 3$ din perioada 2000-2021, algoritmul "K-means" împarte domeniul seismic profund în două clustere (Figura 5 – stânga), rezultând astfel trei clustere în total, în timp ce algoritmul "DBSCAN" găsește o singura distribuție în domeniul seismic profund, rezultând în total doua clustere (Figura 5 – dreapta). Aceste rezultate oferă o justificare obiectivă a analizei separate și comparării parametrilor de seismicitate din zona mai puțin adâncă (60 – 100/120 km) cu cele din zona profundă (100/120 km – 180 km).

Figura 6 (stânga) prezintă distribuția frecvenţă-magnitudine a cutremurelor subcrustale, între anii 2000-2021. Magnitudinea de completitudine a cutremurelor, pentru această perioadă, este 2,9. Valoarea lui b, determinata pentru valori ale magnitudinii $M \geq 2.9$, este relativ ridicată. Pentru un catalog global de cutremure valoarea lui b este în medie aproximativ 1,0 (Frohlich și Davis, 1993). O valoare a lui b mai mare ca 1,0 arată că cutremurele de magnitudine relativ mică sunt predominante, în timp ce o valoare a lui b mai mică ca 1,0 sugerează că cutremurele de magnitudine mai mare sunt relativ predominante.

Figura 6 (dreapta) prezintă numărul cumulativ al cutremurelor intermediare din Vrancea, cu $M \geq 3,0$, în funcție de timp, între anii 2000 şi 2021. Se observă o relație cvasi-liniară, care atestă o rată relativ constantă a cutremurelor subcrustale din Vrancea. Aceasta rată relativ constantă funcție de timp

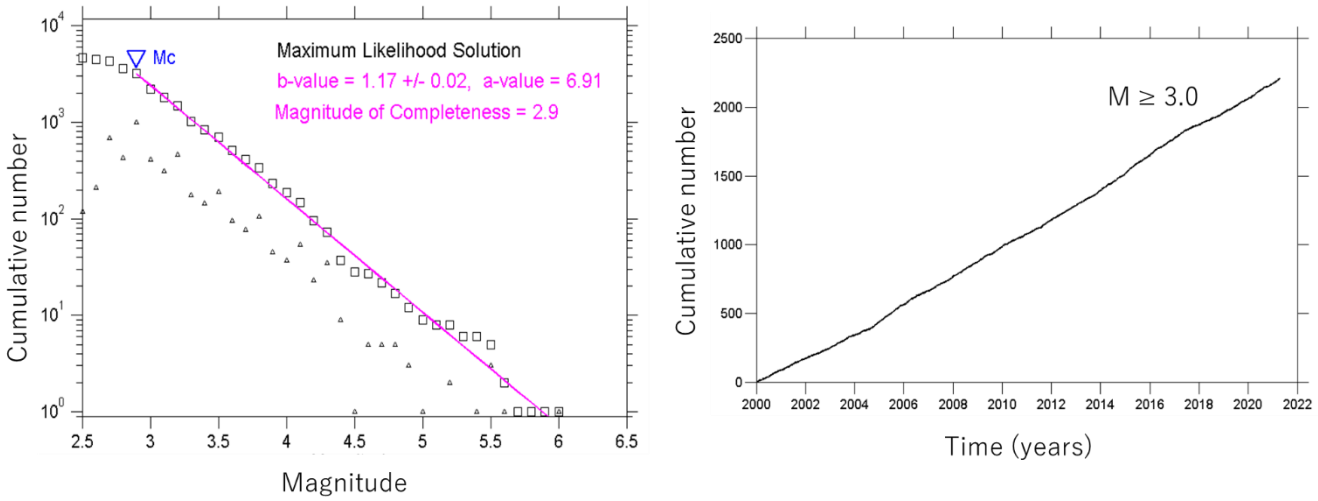


Figura 6. Stânga: Distribuție magnitudine – frecvenţă (cumulativă: dreptunghiuri, non-cumulativă: triunghiuri) pentru cutremurele vrâncene de adâncime intermediară (60 – 220 km). Linia magenta fitează distribuția cumulativă. Fitarea are loc pentru magnitudini M ≥ 2,9. M=2,9 este magnitudinea de completitudine (Mc) a datelor. Dreapta: numărul cumulativ al cutremurelor vrâncene între anii 2000 şi 2021, pentru magnitudini M ≥ 3,0.

sugerează faptul că generarea replicilor seismice este modestă în cazul cutremurelor subcrustale, în concordanță cu observații similare făcute în alte studii la scară regională și globală (e.g., Frohlich, 1987).

O analiză a valorii parametrului b pentru diferite segmente de adâncime este justificată de existența unor clustere distincte pentru diverse adâncimi (Figurile 3, 4 și 5). Compararea seismicității pentru cele doua intervale de adâncime - profund și mai puțin adânc (Figura 7) - arată că valoarea parametrului b (=1,03) pentru zona profundă este mai mic decât cel (b = 1,20) pentru zona mai puțin adâncă. Această observație sugerează ca seismicitatea în segmentul profund este mai energetică, fiind caracterizată de cutremure relativ mai mari. *Din punct de vedere probabilistic este mai probabil să avem următorul cutremur major vrâncean în segmentul profund de adâncime.*

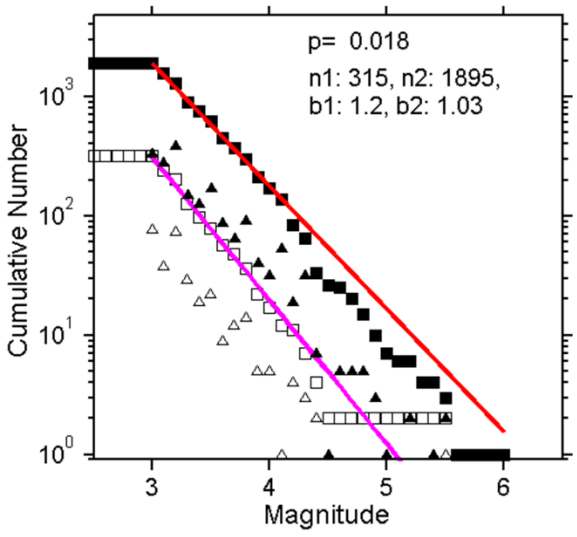


Figura 7. Comparație între distribuțiile frecvență-magnitudine pentru cutremurele (M ≥ 3,0) care se produc în segmentele de adâncime (1) 60 – 100 km şi (2) 100 – 180 km. Triunghiurile reprezintă distribuția non-cumulativă a datelor: triunghiuri goale pentru intervalul (1) şi pline pentru intervalul (2). Pătratele reprezintă distribuția cumulativă: pătrate goale pentru intervalul (1) şi pline pentru intervalul (2). Linia magenta şi cea roșie reprezintă, respectiv, fitarea datelor cumulative pentru intervalul (1) şi (2). Cutremurele în cele doua intervale de adâncime sunt în număr de, respectiv, 315 şi 1895. Valorile lui b pentru cele doua intervale de adâncime sunt, respectiv, 1,2 şi 1,03. Probabilitatea ca cele două eșantioane (distribuții) sa provină din aceeași populație este de ~1,8% (p = 0,018) (calculată folosind relația propusa de Utsu, 1999).

Figura 8 (stânga) prezintă distribuția tuturor cutremurelor din Vrancea între 2000 şi 2021, pentru toată gama de magnitudini, M ≥ 0. Se observă ca zona adânca este caracterizată de cutremure relativ mai mari (cercuri, reprezentând cutremure, de culori albastru-închis) comparat cu zonele mai puțin adânci. în

Figura 8 (dreapta) se observă ca valoarea parametrului b (fiecare "fereastră" pentru care valoarea lui b este calculată conține Ni = 250 de cutremure) scade relativ abrupt pentru adâncimi mai mari de ~120 km. Această observație sugerează ca ponderea relativă a cutremurelor cu magnitudini mai mari crește cu adâncimea. Această concluzie este în concordantă cu constatările făcute la analiza Figurii 7.

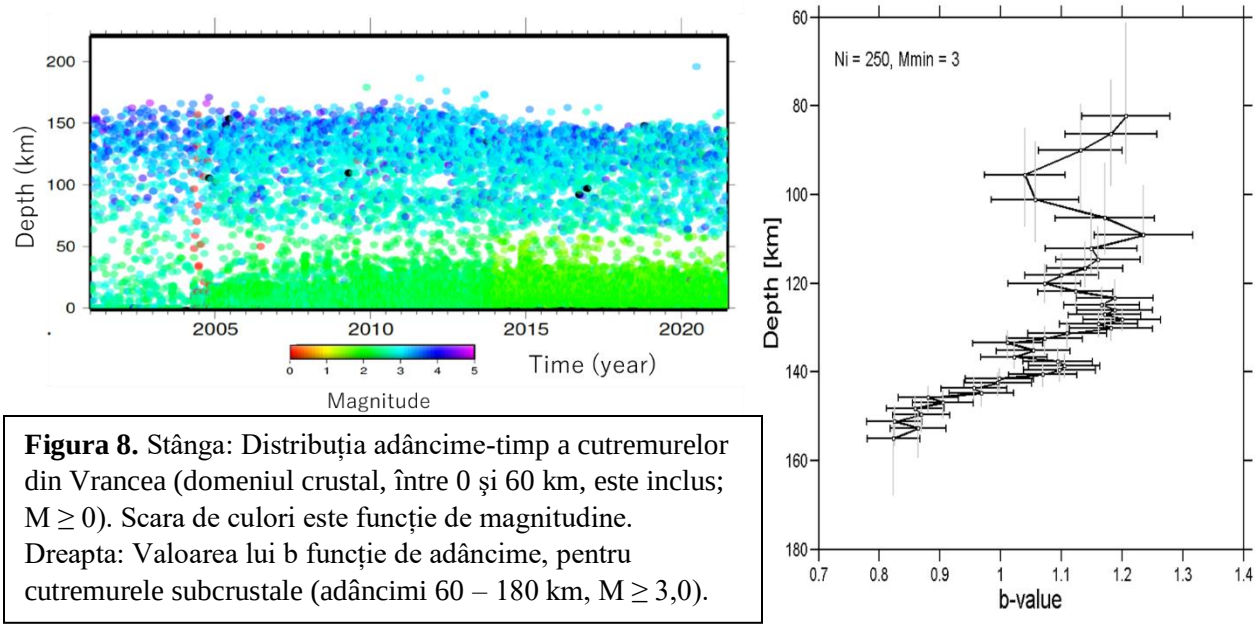


Figura 8. Stânga: Distribuția adâncime-timp a cutremurelor din Vrancea (domeniul crustal, între 0 şi 60 km, este inclus; M ≥ 0). Scara de culori este funcție de magnitudine. Dreapta: Valoarea lui b funcție de adâncime, pentru cutremurele subcrustale (adâncimi 60 – 180 km, M ≥ 3,0).

Selectarea și proiectarea algoritmului și software-ului de prognoză

1) Am ales valoarea z pentru a monitoriza modificările ratei seismicității subcrustale din catalogul ROMPLUS, în funcție de spațiu și timp. Valorile sunt calculate folosind un grid 2D (distanță de-a lungul unui profil funcție de adâncime) cu o distanță între noduri de 5 km (vezi secțiunea următoare pentru implementarea și testarea efectivă). În propunerea de proiect, au fost propuși algoritmii RI (Nanjo et al., 2011) și PI (Tiampo et al., 2002); acești algoritmi sunt similari cu metoda bazată pe analiza parametrul z, deoarece detectează lacunele seismice sau activarea seismicității prin calcularea schimbării ratei de seismicitate. Motivul principal pentru care am optat pentru monitorizarea parametrului z este că acesta are o interpretare statistică clară, care permite testarea semnificației anomaliei de seismicitate. **În acest proiect, fereastra de monitorizare, W_2, a fost aleasa de 1,5 ani (prognoză pe termen lung), dar alte ferestre sunt deasemenea testate activ. Rezultatele sunt actualizate la fiecare 28 de zile. Vom lansa o alarmă atunci când |z| >= 5,0 (Katsumata, 2017).** Chiar daca parametrul z este ales in momentul de față pentru monitorizarea si prognozarea seismicității, suntem în prezent în discuții cu Dr. Nanjo și Dr. Tiampo pentru implementarea unor variante adecvate ale algoritmilor PI si RI pentru teritoriul României, în cadrul unei colaborări.
2) Pe lângă monitorizarea ratei seismicității, vom folosi același grid spațial pentru a monitoriza evoluția valorii b. După cum se explica în secțiunea următoare, o valoare de prag nu a fost stabilită clar până acum. În momentul de față, considerăm ca posibil "anomale" valorile parametrului b mai mici de 1,0.
3) Modelul ETAS de seismicitate (Ogata, 1988) nu este considerat adecvat pentru modelarea seismicității subcrustale din regiunea Vrancea, din cauza deficitului de pre-șocuri/replici seismice pentru cutremurele din această zonă de adâncime, totuși ar putea fi luat în considerare pentru analiza seismicității crustale (anul 2 al proiectului).
4) În ciuda deficitului de pre-șocuri/replici, se încearcă (așa cum este explicat la sfârșitul secțiunii următoare) monitorizarea unei posibile activități de pre-șocuri.

5) Majoritatea rutinelor de calcul sunt implementate în MATLAB, cu ajutorul software-ului ZMAP (Wiemer, 2001), și Python.

Activitatea A1.2. Aplicarea, testarea și calibrarea algoritmilor de prognoză

În această secțiune prezentăm aplicarea metodologiei valorii z la cutremurele subcrustale din zona Vrancea, cu scopul detectării schimbărilor ratei seismicității, care a fost asociată ca fenomen precursor pentru unele cutremure puternice subcrustale din zona Vrancea (e.g., Mârza, 1979). Discutăm de asemenea calibrarea metodei. Prezentăm, de asemenea, variația în timp a parametrului b și o nouă metodă de detectare a pre-șocurilor și replicilor seismice care poate fi utilă pentru prognoza seismică.

Parametrul z

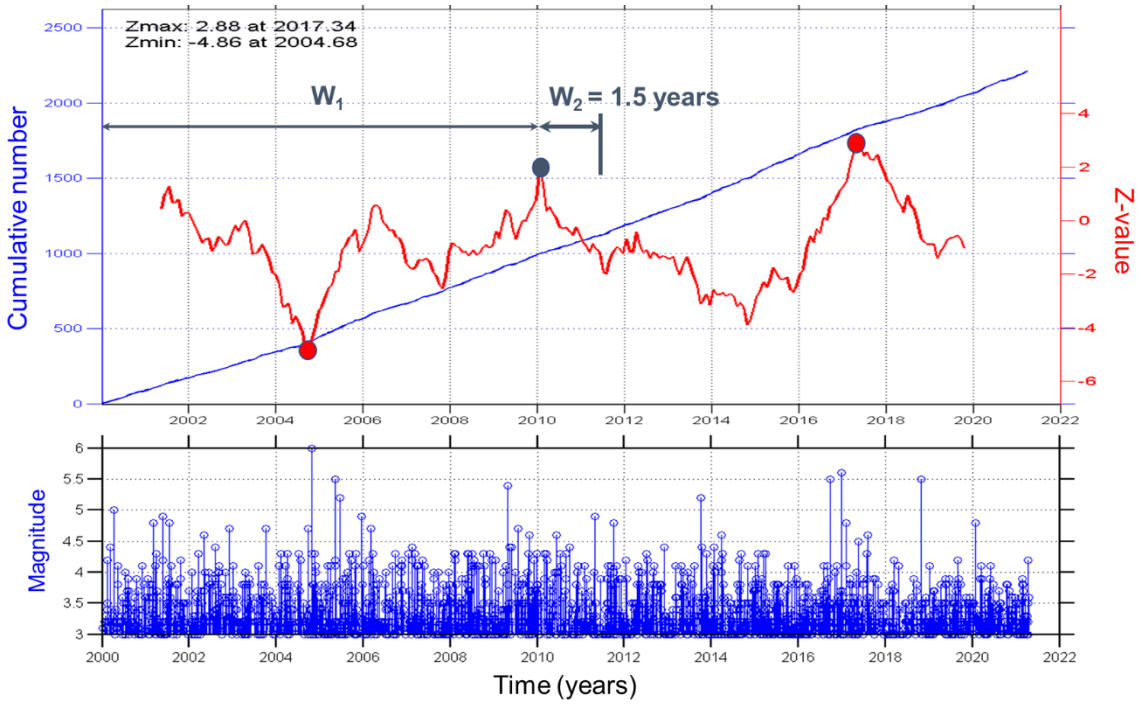


Figura 9. Sus: Numărul cumulativ al cutremurelor ($M \geq 3,0$) subcrustale din zona Vrancea, împreună cu valoarea parametrului z în funcție de timp. Fereastra W_1 se extinde de la începutul perioadei de studiu până la momentul pentru care se determină parametrul z, în timp ce fereastra W_2 a fost aleasă de 1,5 ani. Valoarea lui z este calculată folosind un pas (shift al ferestrei) de 28 zile. Figura indică valoarea maximă (2,88, obținută pentru anul 2017,34) și minimă (-4,86, obținută pentru anul 2004,68) a valorii parametrului z. Jos: Grafic al magnitudinii funcție de timp pentru cutremurele subcrustale din Vrancea.

Figura 9 (sus) prezintă variația parametrului z (introdus în secțiunea precedentă, la Metode) împreună cu numărul cumulativ al cutremurelor de adâncime intermediară din Vrancea în funcție de timp. Nici o valoare a lui z nu depășește, in valoare absolută, pragul de 5 (adoptat de Katsumata, 2017), discutat la Metode. Cu toate acestea, valorile minimă și maximă ale parametrului sunt peste pragurile de confidență statistică (= 2,58) asociate cu o distribuție normală și, prin urmare, merită o discuție aparte. Valoarea minimă este înregistrată după mijlocul anului 2004 (2004,68) și, foarte probabil, corespunde unor cutremure cu magnitudini M >= 5,5 (Figura 9, jos), produse în anii 2004-2005, ceea ce a rezultat într-o creștere relativă, ușoară, a ratei cutremurelor detectate pentru acea perioadă. Valoarea maximă a parametrului z (= 2,88) a fost înregistrată în anul 2017,34 și indică o scădere relativă, foarte ușoară, a ratei cutremurelor înregistrate. Este dificil însă sa asociem această scădere a ratei cu un anume fenomen precursor; este necesar, prin urmare, să ne uităm la variația parametrului z pentru diverse niveluri de adâncime.

Figura 10 arată numărul cumulativ al cutremurelor de adâncime intermediară din Vrancea, funcție de timp, pentru diverse intervale de adâncime. Observația cea mai clară este rata foarte redusă a cutremurelor produse în intervalul de adâncime 150 – 160 km, după anul 2014, care ar putea semnala o eventuală lacună seismică cu caracter precursor (Moldovan și colab., 2021).

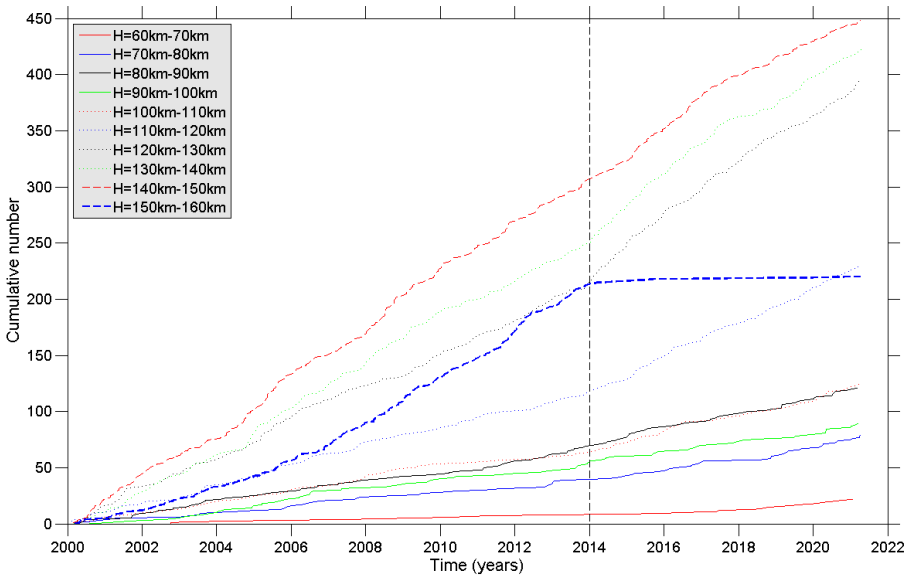


Figura 10. Numărul cumulativ al cutremurelor (M ≥ 3,0) de adâncime intermediară (adâncime ≥ 60 km) din Vrancea, funcție de timp. Liniile de culori diferite indică diverse intervale de adâncime, așa după este indicat în legenda din stânga-sus a figurii.

Distribuția adâncime-timp a cutremurelor (M ≥ 3,0) subcrustale din zona Vrancea (Figura 11) confirmă observația făcută anterior (Figura 10), legată de existenta unei anomalii de seismicitate în intervalul de adâncime 150 – 160 km, de la începutul anului 2014. După cum se observă în Figurile 10 și 11, schimbarea ratei seismicității, începând cu anul 2014, este relativ bruscă. Vom arăta în cele ce urmează că procedura bazată pe analiza parametrului z identifică corect această lacună seismică.

Figura 12 arată gridul (grila) folosit pentru calculul parametrului z. Deoarece seismicitatea vrânceană este preponderent extinsă pe adâncime, un astfel de grid, în secțiune verticală, este considerat adecvat pentru analiză și prognoză.

In Figura 13 prezentăm distribuția parametrului z, folosind gridul din Figura 12, pentru momentul 2014,0. Valori pozitive ale parametrului z, cu valori absolute |z| ≥ 5, sunt obținute doar pentru zona profundă, între 150 și 160 km adâncime. Aceasta observație confirmă capacitatea parametrului z de a identifica zone în care rata seismicității este anomală (fie în descreștere ori creștere). Valoarea absolută folosită drept limită (|z| = 5) pentru a declara o schimbare semnificativă a ratei activității seismice, cu posibil caracter precursor, pare să fie adecvată zonei Vrancea.

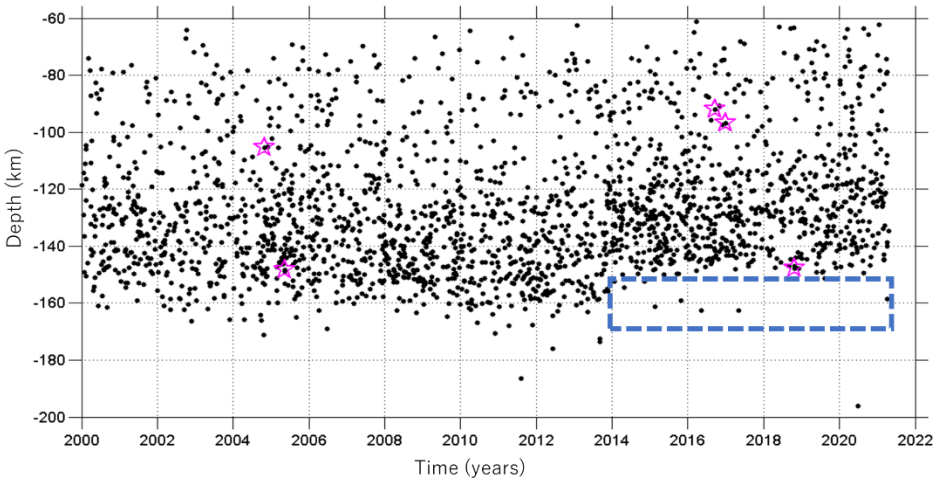


Figura 11. Distribuția adâncime-timp a cutremurelor (M ≥ 3,0) de adâncime intermediară din zona Vrancea. Stelușele magenta indică cutremurele cu M ≥ 5,5. Dreptunghiul delimitat de linia punctată de culoare albastră indică zona de "liniște seismică" detectată de asemenea în Figura 10.

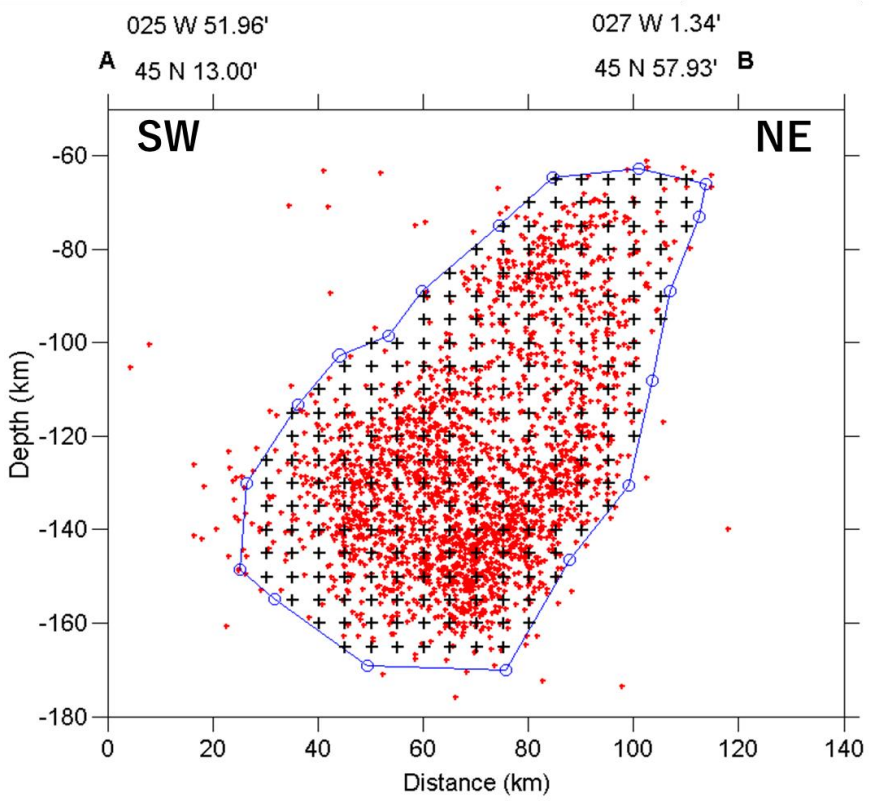


Figura 12. Distribuția cutremurelor (puncte roșii) de adâncime-intermediară într-o secțiune verticală orientată SW – NE (longitudinile și latitudinile punctelor A și B care definesc secțiunea sunt date în figură; secțiunea este realizată de-a lungul distribuției cu forma dreptunghiulară (Figura 1) a epicentrelor cutremurelor subcrustale vrâncene), împreună cu gridul (grila) (5 x 5 km) folosit pentru calculul parametrului z. Pentru fiecare nod (cruciuliță neagră) al gridului cele mai apropiate Ni=100 cutremure sunt selectate pentru calculul parametrului z.

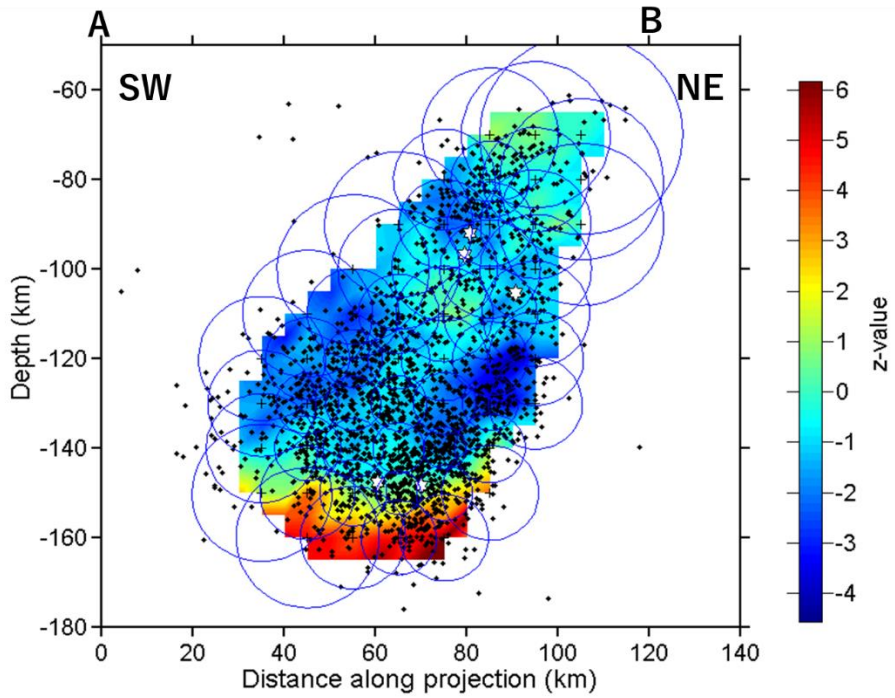


Figura 13. Distribuția parametrului z, folosind gridul definit în Figura 12, pentru momentul 2014,0 (fereastra W_2 este de 1,5 ani). Culorile arată valoarea parametrului z în acord cu scara din dreapta secțiunii verticale. Cutremurele sunt indicate prin puncte negre. Stelețele albe indica cutremure cu $M \geq 5{,}5$. Cercurile albastre indica ariile pentru selecția cutremurelor (Ni = 100) folosite pentru fiecare nod al gridului. Valorile pozitive ale parametrului z indică o relativa liniște seismică, în timp ce valorile negative indică o activare a seismicității. (Enescu et al., 2021).

Descoperirea lacunei seismice a impus o verificare amănunțită a unor posibile surse de erori sau inconsistențe care să fi creat în mod artificial această anomalie seismică. Consultând buletinele ROMPLUS, am descoperit că cutremurele produse după 2014 au fost localizate cu un model de viteze global și software-ul Antelope (dezvoltat de "Boulder Real Time Technologies"), în comparație cu cele de dinainte, care au folosit un model de viteze local și programul HYPOPLUS (Oncescu şi colab., 1996). Pentru a verifica dacă această schimbare de procedură afectează locațiile cutremurelor, am decis să localizăm câteva cutremure produse după 2014, folosind și programul HYPOPLUS (Tabelul 1).

No.	Date	Origin time	Latitude	Longitude	Depth	Mw	Location program
1	01.09.2016	07:49:21.38	45.607	26.394	144.1	4.1	Antelope
			45.607	26.373	155.0		HYPOPLUS
2	04.08.2016	10:54:40.84	45.587	26.549	140.1	4.1	Antelope
			45.607	26.533	153.8		HYPOPLUS
3	19.11.2016	11:30:39.22	45.641	26.508	140.8	4.1	Antelope
			45.675	26.477	152.2		HYPOPLUS
4	24.08.2014	07:12:49.66	45.568	26.368	147.3	4.2	Antelope
			45.592	26.351	158.4		HYPOPLUS
5	25.04.2018	17:15:48.98	45.607	26.432	147.6	4.1	Antelope
			45.625	26.412	156.9		HYPOPLUS
6	28.10.2018	00:38:11.39	45.608	26.407	147.8	5.5	Antelope
			45.614	26.397	161.6		HYPOPLUS
7	29.03.2014	01:55:16.61	45.346	26.231	144.1	4.0	Antelope
			45.350	26.226	158.1		HYPOPLUS
8	29.03.2015	00:44:58.44	45.619	26.478	145.4	4.3	Antelope
			45.657	26.457	156.7		HYPOPLUS

Tabel 1. Exemplu de 8 cutremure (cu magnitudini-moment, Mw, mai mari de 4,0) localizate cu două programe diferite, Antelope şi HYPOPLUS. Magnitudini sunt prezente, în acest exemplu, doar pentru cutremurele procesate cu Antelope.

După cum se observă în Tabelul 1, diferențele de adâncime între cele două localizări (Antelope şi HYPOPLUS), pentru același cutremur, sunt de cel puțin 9 km (cutremurele devin mai adânci atunci când este folosit sistemul HYPOPLUS, pentru care modelul de viteze folosit este unul local). Această observație arată că lacuna seismică după anul 2014, în intervalul de adâncimi 150 – 160 km, este rezultatul unor probleme de localizare și nu reflectă un fenomen fizic.

In momentul de față suntem în curs de a corecta aceasta problemă şi de a relocaliza toate cutremurele folosind același sistem de calcul. Important pentru analiza noastră nu este atât adâncimea absolută a cutremurelor, cât mai degrabă consistența localizărilor. Cu alte cuvinte, este necesar ca toate cutremurele sa fie localizate cu același program.

Parametrul b

Pe lângă analiza parametrului z, care poate pune în evidentă perioade de timp în care rata seismicității cunoaște schimbări semnificative, propunem deasemenea monitorizarea parametrului b, care detectează schimbări în proporția relativă a cutremurelor mici şi mari, şi care poate avea, deasemenea, un caracter precursor. Variația parametrului b în funcție de timp (Figura 14) pune în evidentă două caracteristici aparte: (1) o creștere a valorii medii a lui b în intervalul 2011 – 2021 în comparație cu intervalul 2000 – 2011 şi (2) o creștere urmată de o scădere abruptă a parametrului b în jurul anului 2016. Caracteristica (1) poate fi legată de schimbarea scării de magnitudini, care are o istorie destul de complexă. Nu este încă foarte clar ce cauzează (2), dar este posibil sa fie legată de producerea unor cutremure cu magnitudini $M \geq 5,0$ în perioada respectivă.

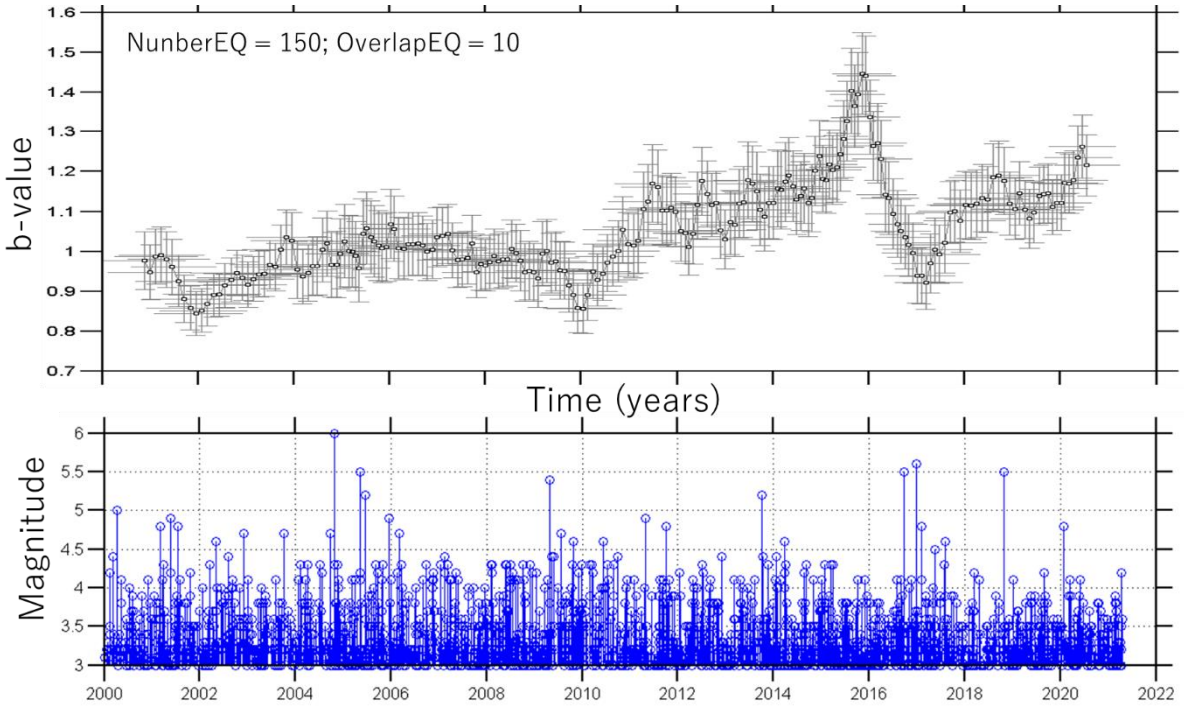


Figura 14. Sus: Variația parametrului b în funcție de timp, între anii 2000 și 2021, pentru cutremurele subcrustale vrâncene cu M ≥ 3,0. Numărul cutremurelor în fiecare fereastră temporală este de 150, fereastra este mutată (shiftată) cu câte 10 cutremure pentru fiecare fereastră succesivă. Liniuțele orizontale indică lungimea ferestrelor folosite pentru estimarea fiecărei valori a lui b, în timp ce liniuțele verticale indică incertitudinile de estimare. Jos: Grafic al magnitudinii în funcție de timp pentru cutremurele subcrustale din Vrancea, între anii 2000 și 2021.

Se impune așadar o re-evaluare a magnitudinilor cutremurelor din catalogul ROMPLUS pentru a obține un catalog omogen din punct de vedere al magnitudinilor. In momentul de față, analiza parametrului b folosind același grid pentru care au fost calculate valorile parametrului z (Figura 13) este implementată, dar considerăm ca rezultatele vor putea fi de încredere doar atunci când problema magnitudinii va fi remediată.

Nouă metodă de detectare a preșocurilor și replicilor seismice

Figura 15 prezintă distribuția adâncime-timp pentru cutremurele vrâncene cu magnitudine M ≥2,5, dintre 2004 și 2021, atât în domeniul crustal cat și cel subcrustal. O analiză mai detaliată arată că exista 3 roiuri de cutremure cu evenimente similare, de magnitudine mică și apropiate în timp, și aproximativ 9 familii de cutremure dominate de activitate de preșocuri (mai degrabă decât de replici), în cea mai mare parte localizate în domeniul subcrustal. Aici menționăm doar că această metodologie, relativ nouă, este promițătoare atât pentru înțelegerea generării cutremurelor vrâncene, cat și pentru potențialul lor de predictibilitate.

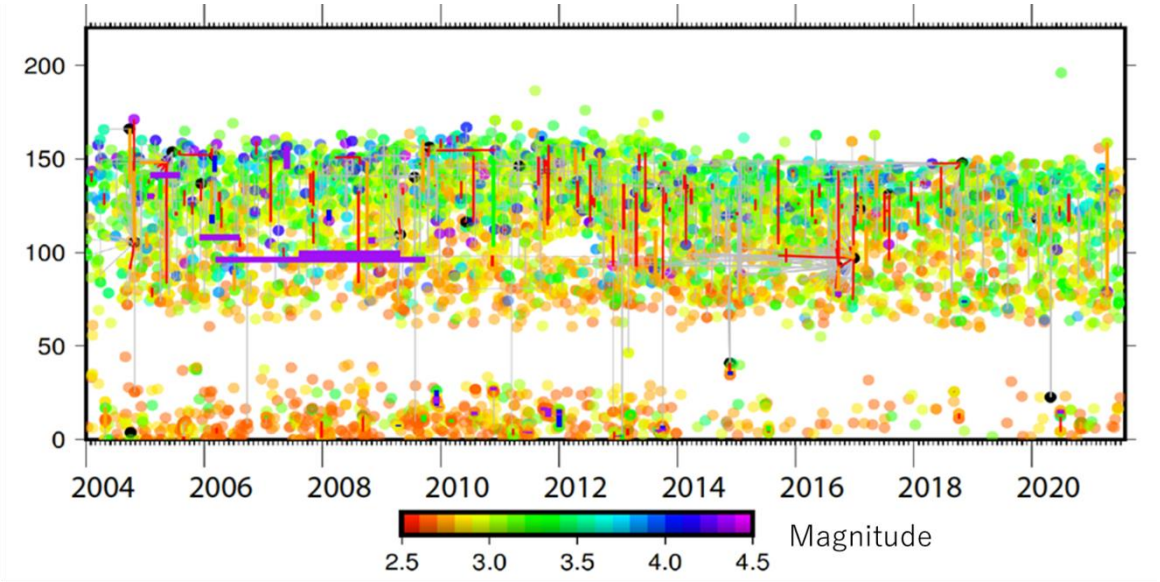


Figura 15. Distribuția adâncime-timp a cutremurelor vrâncene (cu adâncimi între 0 – 200 km), între 2004 și 2021, colorată în funcție de magnitudine, cu linii care conectează cutremurele corelate pentru un log(eta) > -4 (a se vedea Zaliapin și Ben-Zion, 2013, pentru detalii – eta este un parametru care cuantifică apropierea evenimentelor seismice în timp și spațiu). (Petrescu et al., lucrare în pregătire)

3. Concluzii, cu evidențierea a ceea ce s-a realizat din obiectivele propuse

1. Am analizat în detaliu seismicitatea de adâncime intermediară din regiunea Vrancea (România), conform catalogului de cutremure ROMPLUS, și i-am caracterizat structura spațiu-timp, magnitudinea de completitudine, modificările ratei seismicității și valoarea parametrului b în funcție de timp și adâncime. (*Obiectiv realizat în integralitate: analiza seismicității subcrustale*)
2. Rezultatele noastre pun în evidentă o grupare clară a seismicității, așa cum este indicat de inspecția vizuală a distribuției cutremurelor, histograme, precum și de aplicarea a doi algoritmi diferiți de grupare spațială a datelor, bazați pe tehnici de tip "machine-learning". Am constatat că în partea profundă a zonei seismogenice subcrustale, cutremurele relativ mai mari au loc mai des decât în zona mai puțin adâncă.
3. Am implementat o tehnică de calcul pe grilă ("gridding technique") pentru a monitoriza modificările valorii parametrului statistic z și am prezentat procedura de utilizare a parametrului în scopuri de prognoză seismică, prin urmărirea posibilelor perioade de lacună seismică sau accelerare a activității seismice. Pragul propus pentru declararea unei "alarme" se bazează pe studii anterioare din diferite regiuni seismice ale lumii. Acumularea de date noi va permite rafinarea și îmbunătățirea/calibrarea parametrilor actuali ai metodei. (*Obiectiv realizat în mare proporție: selectarea și aplicarea algoritmului de prognoză; partea de calibrare necesită rezolvarea problemei determinării adâncimii – vezi punctul 5*).
4. Pe lângă monitorizarea valorii z, monitorizăm activ și parametrul b în funcție de spațiu și timp, pentru seismicitatea subcrustală din zona Vrancea. Acest parametru poate oferi informații legate de schimbări în frecvența relativă a cutremurelor din diferite benzi de magnitudine (*Obiectiv realizat în mare proporție: selectarea și aplicarea algoritmului de prognoză; partea de calibrare necesită rezolvarea problemei determinării omogene a magnitudinii – vezi punctul 5)*.
5. In timpul analizei catalogului, am detectat unele probleme de neomogenitate a determinării adâncimii și magnitudinii cutremurelor. In prezent, localizăm cutremurele din catalogul ROMPLUS folosind

același model de viteze si, deasemenea, încercăm să folosim o metodologie unitară de determinarea a magnitudinii.

6. Am introdus o nouă abordare pentru analiza seismicității Vrancei, bazată pe proximitatea cutremurelor în timp și spațiu. Această metodă poate permite detectarea șocurilor și replicilor în timpul secvențelor de cutremure în curs de desfășurare. Metoda poate avea deasemenea implicații importante în ceea ce privește mecanismul de producere a cutremurelor vrâncene.

4. Bibliografie

Aki, K. (1965). Maximum likelihood estimate of b in the formula log N = a- bM and its confidence limits, *Bull. Earthquake Res. Inst.*, Tokyo University, 43, 237-239.

Arthur, D. and Vassilvitskii, S. (2006). k-means++: the advantages of careful seeding, *Tech. rep., Stanford*.

Dinu C., Răileanu V. and project members (2008). Map with the main fault systems, Romania. *Project CEEX no. 647/2005*.

Enescu, D. and Enescu, B.D. (1996). Focal mechanism and Vrancea (Romania) earthquake prediction. A model for predicting these earthquakes, *Rev. Roum. Geophys.*, 40, 17-32.

Enescu, B. and Ito, K. (1999). Precursory phenomena of seismicity in the Vrancea region, Romania, *Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, 42(B-1), 113-123.

Enescu, D., Mârza, V. and Zamarca, I., (1974). Contributions to the statistical prediction of Vrancea earthquakes, *Rev. Roum. Geophys.*, 18, 67-79.

Enescu, B. and Ito, K. (2001). Some premonitory phenomena of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake: seismicity, b-value and fractal dimension, *Tectonophysics*, 338, 3-4, 297-314.

Enescu, B., Moldovan, I-A., Ionescu, C., and the AFROS Team (2021), Analysis and Forecasting of Romanian Seismicity (AFROS) Project: Aim and Preliminary Results, *AGU Meeting*, NH25A-0542 (accepted for poster presentation).

Ester, M., H. P. Kriegel, J. Sander, and X. Xu, (1996). "A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise". *In: Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, Portland, OR, AAAI Press, pp. 226-231.

Frohlich, C. (1987). Aftershocks and temporal clustering of deep earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 92(B13), 13944– 13956, doi:10.1029/JB092iB13p13944.

Frohlich, C., and Davis, S. (1993). Teleseismic b values; or, much ado about 1.0., *J. Geophys. Res.*, 98(B1), 631-644.

Georgescu, E.-S. (2004). Forensic engineering studies on historical earthquakes in Romania, *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, B.C., August 1-6, 2004, Paper no. 2444.

Hurukawa, N. and Imoto, M., (2010). Periodic upward migration model for intermediate-depth earthquakes in Vrancea, Romania. *Earth Planet Space*, 62, 463–47.

Gutenberg, R. and C.F. Richter (1944). Frequency of earthquakes in California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 34, 185-188.

Habermann, R.E., (1983). Teleseismic detection the Aleutian Island Arc., *J. Geophys. Res.*, 88(B6), 5056-5064.

Hurukawa, N., Popa, M. and Radulian, M. [2008] Relocation of large intermediate-depth earthquakes in the Vrancea region, Romania, since 1934 and a seismic gap, *Earth Planets Space*, 60, 565–572.

Katsumata, K. (2017). Long-Term Seismic Quiescences and Great Earthquakes and Around the Japan Subduction Zone Between 1975 and 2012, *Pure and Applied Geophysics*, 174(6), 2427-2442.

Lloyd, S. (1982). Least squares quantization, *PCM. IEEE Trans. Inf. Theory*, 28 (2), pp. 129-137.

Mârza, V.I., (1979). The March 4, 1977 Vrancea earthquake seismic gap, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 69(1), 289-291.

Moldovan, I., Enescu, B., Ghiță, C., Ionescu C., and Mărmureau, A., (2021). A Possible Seismic gap in Vrancea (Romania) Zone at Depths below 150km, Conference Proceedings, *11th Congress of the Balkan Geophysical Society*, Oct 2021, Volume 2021, p.1 – 5, doi:10.3997/2214-4609.202149BGS57.

Moldovan, I.A., Popescu, E. and Constantin A. (2008). Probabilistic seismic hazard assessment in Romania: application for crustal seismic active zones, *Rom. Journ. Phys.*, 53, 3-4, 575-591.

Nanjo, K. Z., Tsuruoka, H., Hirata, N., and Jordan, T.H., (2011). Overview of the first earthquake forecast testing experiment in Japan, *Earth Planets Space*, 63(3), 159–169, doi:10.5047/eps.2010.10.003.

Ogata, Y., (1988). Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, *Journal of American Statistical Association*, 83(401), 9–27.

Oncescu M.C., Mârza V.I., Rizescu M. and Popa M., (1999). The Romanian earthquake catalogue between 984 – 1997. In: Wenzel F., Lungu D., Novak O. (eds) *Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation. Advances in Natural and Technological Hazards Research*, vol 11. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4748-4_4.

Oncescu, M.C., Rizescu, M. and Bonjer, K.P., (1996). SAPS—a completely automated and networked seismological acquisition and processing system, *Comp. Geosci.*, 22, 89–97.

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python, *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825-2830.

Petrescu, L. et al. (2021). Clustering properties of Vrancea seismicity, *paper in preparation*.

Radu, C. (1979). Catalogue of strong earthquakes occurred on the Romanian territory. Part I. — before 1901; Part II — 1901 -1979, in I. Cornea and C. Radu (eds.), *Seismological Studies on the March 4*, 1977 *Earthquake*, Bucharest, 723–752 (in Romanian).

Radulian, M. and Trifu, C.I. (1991). Would it have been possible to predict the 30 August 1986 Vrancea earthquake?, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 81(6), 2498-2503.

Schubert, E., Sander, J., Ester, M., Kriegel, H. P., & Xu, X. (2017). DBSCAN revisited, revisited: why and how you should (still) use DBSCAN, *ACM Transactions on Database Systems (TODS)*, 42(3), 19.

Tiampo, K. F., Rundle, J.B., McGinnis, S., Gross, S.J., and Klein W., (2002). Mean-field threshold systems and phase dynamics: an application to earthquake fault systems, *Europhysics Letters*, 60(3), 481–488.

Utsu T., (1999). Representation and analysis of the earthquake size distribution: a historical review and some new approaches, *Pure and Applied Geophysics*, 155, 509–535.

Wiemer, S., (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismol. Res. Lett.*, 72(3), 373-382, https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373.

Wiemer, S., and M. Wyss (2000). Minimum magnitude of complete reporting in earthquake catalogs: examples from Alaska, the western United States, and Japan, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90, 859–869.

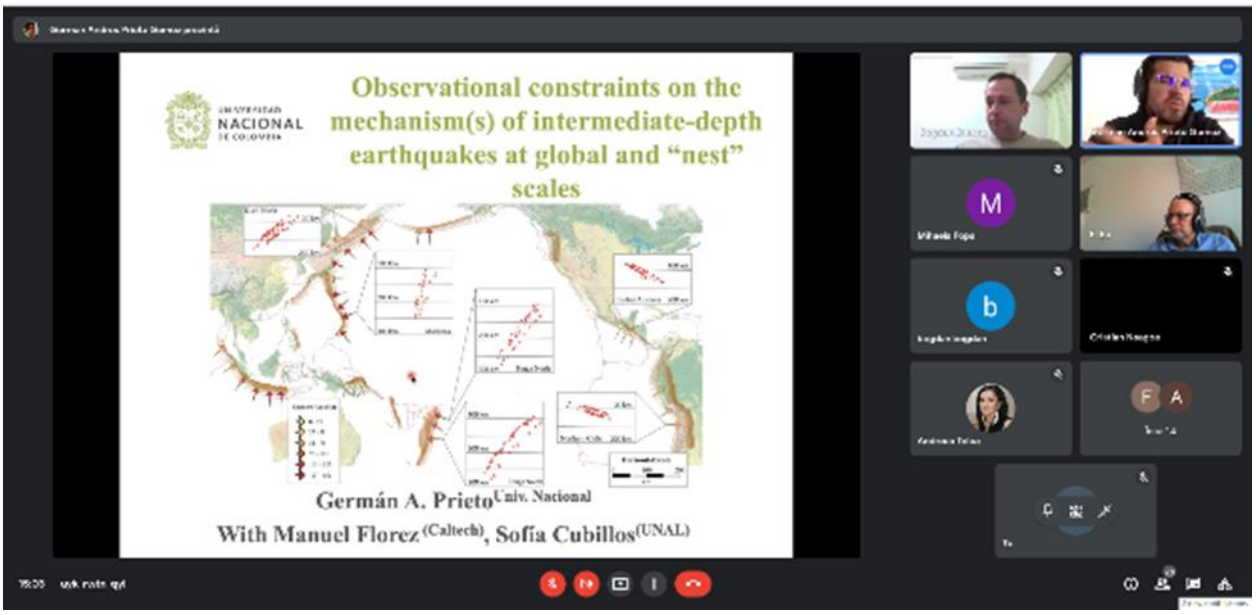
Zaliapin, I. and Ben-Zion, Y., (2013). Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(6), pp.2847-2864.

5. Rezultatele etapei

- Modelarea seismicității subcrustale şi algoritmi de prognoză - *raport de cercetare: Activitatea A1.1*;
- Estimarea și prognozarea parametrilor seismicității de adâncime intermediara – *raport de cercetare: Activitatea A1.2*;
- Creșterea expertizei în analizarea seismicității (inclusiv însușirea unor tehnici ML) a celor 2 doctoranzi – raport de instruire: In timpul primului an de desfășurare a proiectului am organizat 5 seminare cu invitarea următorilor oameni de știință: Dr. Xiong Ziyao (Institute of Statistical Mathematics, Tokyo, Japan; 27 Iulie 2021), Dr. Kate Chen (National Taiwan Normal University, Taiwan; 28 Iulie 2021), Dr. Takahiko Uchide (Geological Survey of Japan, Tokyo, Japan; 25 August 2021), Dr. Maximilian Werner (University of Bristol, UK; 30 Septembrie 2021) și Dr. German Prieto (National University of Colombia, Colombia; 3 Noiembrie 2021). Toți membrii proiectului, inclusiv cei doi doctoranzi, Alina Coman și Andrei Mihai au participat la seminarii. Prezentarea Dr. Uchide a conținut elemente de ML aplicate la

probleme de Seismologie. 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.

• Pe lângă activitățile de cercetare legate de seismicitatea subcrustală, am lucrat și în ceea ce privește seismicitatea crustală, adresând problema contaminării cu explozii a catalogului, și am instalat stații de monitorizare a radonului.



Screenshot de la unul din seminariile organizate în cadrul proiectului AFROS (Conferențiar: Dr. German Prieto, National University of Colombia; 3 Noiembrie 2021)

6. Modul de diseminare a rezultatelor

• Publicare articole:

In timpul primului an de activitate, membrii proiectului au publicat: 3 articole în jurnale cotate ISI, 1 articol în jurnal indexat ISI (va fi cotat în viitor), 2 articole în jurnale indexate BDI, 1 articol în revizie în jurnal indexat BDI (vezi Anexa 1). Unul dintre articolele cotate ISI a fost publicat în jurnalul ”Scientific Reports”, Nature Publishing Group.

• Prezentări conferințe: 11 prezentări în total (vezi Anexa 1 pentru detalii)

• Realizare pagină web (in limbile Romană și Engleză): http://afros.infp.ro/

Nota 1: Detalii despre lucrările si prezentările membrilor proiectului au fost încărcate si pe platforma EVoC (însă doar publicațiile/prezentările unde s-a mulțumit explicit proiectului AFROS).