

## **Obiectiv 2.2. Analize si investigatii ale TEC folosind datele GPS/GNSS oferite de retelele partenere (INCDFP SI FRC)**

In ultimele doua decade s-a facut un mare efort pentru a analiza si posibil prezice evenimentele seismice prin monitorizarea ionosferei. Acest lucru a fost posibil mai ales cu ajutorul dezvoltarilor tehnologice cum ar fi tehnicile de tip “ground based” utilizate pentru a studia propagarea subionosferica a undelor radio VLF/LF [Moldovan et. Al, 2015] in statul de jos si cel de mijloc al ionosferei folosind ionosonde si instrumente bazate pe masuratori satelitare pentru a investiga stratul superior al ionosferei. Pentru a suplimenta aceste tehnici retelele numeroase de receptoare GNSS au permis monitorizarea la maxim a plasmei ionosferice via continutului total de electroni (Total Electron Content -TEC-) si a tomografiei ionosferice.

Recent, legatura dintre cutremure si perturbările ionosferice anterioare unui seism a capatat o atentie sporita. Au fost identificati posibil precursori la cutremure printre care deformari ale suprafetei, emisii de radon/heliu, stresul la nivel crustal, anomalii atmosferice de ordin termic [Pulinets and Boyarchuc, 2004]. Emisiile de gaz cea au loc anterior unui seism cauzeaza ionizarea atmosferei neutre de deasupra epicentrului, astfel generand un camp electric anormal care penetreaza ionosfera conducand la anomalii mari pozitive/negative ale concentrării electronilor in vecinatatea epicentrului. Acest camp electric nu se limiteaza numai la epicentru, ci acopera o zona in functie de magnitudinea cutremurului numita si zona de preparare [Dobrovolsky et al, 1979]. Mai mult, unele Gravitationale Atmosferice (Atmospheric Gravity Waves -AGW-) sunt generate de activitatea preseismica a gazelor emanate. Cele mai cunoscute perturbari ale lungimilor de unda sunt perturbările ce apar la strabaterea ionosferei (TIDs) ce sunt asociate cu AGW si deasemenea cu propagarea pe directie verticala a undelor infrasonice, amplificate de descresterea exponentila a densitatii atmosferice [Artru, et al, 2004]. S-a demonstrat ca din punct de vedere statistic precursorii ionosferici sunt observati de la 12 zile la cateva ore inaintea producerii unui seism si ca acestea ar trebui sa depaseasca un prag de magnitudine de 5 grade Richter pentru a provoca perturbari ionosferice. Durata unei devieri ionosferice indusa de seism este scurta, de ordinul a 4-6 ore, in comparatie cu anomalii cauzate de furtuni geomagnetice sau alte perturbari [Pulinets and Boyarchuc, 2004].

Obiectivul acestui studiu este de a investiga posibile anomalii ionosferice precursore a patru cutremure ce au avut loc in Romania cu magnitudinea Mw cuprinsa intre 5.2 si 6.0, in urma unei abordari in mai multe directii, folosinduse date de TEC, obtinute de reseaua nationala GNSS/GPS.

### **Prelucrarea datelor RINEX furnizate de retelele GPS/GNSS pentru a obtine informatii despre TEC inainte, in timpul si imediat dupa cutremurele mari.**

In tabelul 1 sunt prezentate cele 4 evenimente seismice luate in calculul acestui studiu si caracteristicile lor principale. Pentru a detecta posibilele anomalii ionosferice anterioare unui cutremur, datele TEC utilizate au fost obtinute din masuratorile de cod si dubla frecventa ale receptorilor GPS de pe teritoriul Romaniei si apartin retelei nationale de statii permanente GPS

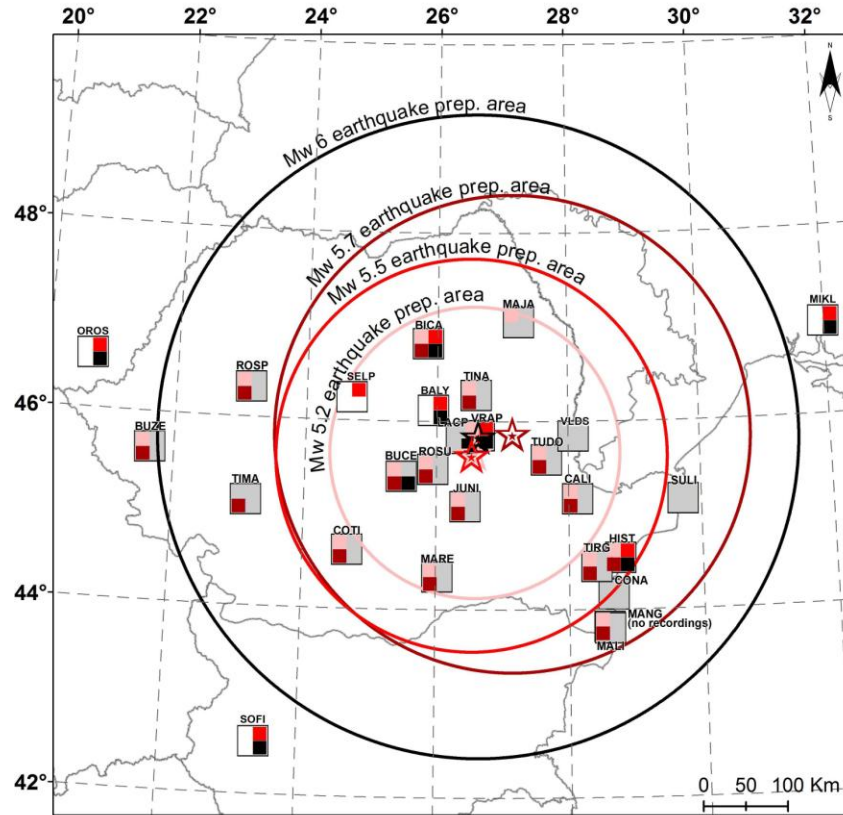
instituita in anul 2001. Figura 1 arata harta retelei de statii GPS, epicentrele cutremurelor si zona de preparare a fiecarui eveniment seismic. Pentru a se calcula valoarea TEC pe directie verticala (vTEC) am procesat fisiere in format RINEX obtinute de la statiile GPS selectate folosind un algoritm de calibrare [Ciraolo, 1993]. Aceasta tehnica de procesare are ca model stratu subtire inosferic (localizat la 350 km altitudine) pentru a obtine vTEC din inclinatia continutului total de electroni (sTEC) al punctului de patrundere in ionosfera (Ionospheric Pierce Point -IPP-). Unghiul de taiere folosit este  $\geq 67^\circ$ .

Table1 Lista evenimentelor seismice produse in Romania si caracteristicile lor

Seismic events No.	Year	Month	Day	Latitude North (°)	Longitude East (°)	Magnitude Mw	Depth (Km)	Preparation Area Radius (Km)
1.	2014	11	22	45.87	27.15	5.7	39	282.488
2.	2013	10	6	45.67	26.58	5.2	135.1	172.1869
3.	2005	5	14	45.64	26.53	5.5	148.5	231.7395
4.	2004	10	27	45.84	26.63	6	105.4	380.1894

Mai intai s-a incercat identificarea posibilelor perturbari semnificative ale datelor TEC inaintea cutremurelor folosindu-se metoda statistic apei strat: considerand distributia normala  $m$  media si deviatia standard a valorilor TEC  $\sigma$ , valorile asteptate pentru limitele superioare si inferioare a statului sunt  $m \pm 1.34\sigma$ . Daca valorile TEC observate nu se incadreaza in limitele superioara sau inferioara asociate unui asemenea interval, atunci un semnal anormal se detecteaza cu o precizie de aproximativ 82% [Nenovski et al, 2015].

S-au aplicat apoi metode de cross-corelare pe valorile TEC folosind un punct de referinta localizat in interiorul zonei de preparare si unul sau mai multe puncte localizate in afara acesteia. Zona de prepare este zona in care ionosfera din partea superioara este afectata de precursorii seismici si este defnita ca un cerc cu raza  $\rho=100.43M$  km, unde  $M$  este magnitudinea ( $M_w$ ) cutremurului [Dobrovolsky, et al, 1979]. De vreme ce variabilitatea ionosferica indusa de activitatea seismica este general inferioara variatiilor legate de furtunile geomagnetice, aceasta este umbrita de variatiile in timp ale furtunii. Pentru a depasii aceasta problema cele doua puncte de referinta trebuie sa fie in aceeasi latitudine geomagnetica sau in latitudini apropiate, astfel incat variatiile ionosferice inregistrate la ambele puncte sa arate comportament similar in conditii geomagnetice normale si anormale. Asadar, coeficientul de corelare va fi unul mare. Pe de alta parte se asteapta ca in timpul activitatii seismice coeficientul de corelare al punctelor sa scada de vreme ce statia mai apropiata de epicentru (in interiorul zonei de preparare) va fi mai sensibila la variatiile seismice decat statia aflata in exteriorul zonei de prepare. Pe deasupra lungitudinea celor doua locatii nu ar trebui sa fie atat de diferita avand in vedere ca inosfera variaza o data cu aceasta.



**Figura 1- Harta Romaniei aratand: a) Zonele de preparare si epicentrele ale celor 4 cutremure examinate ; b) Reteaua nationala de statii GPS permanente. Sunt indicate cu roz statiile GPS folosite pentru evenimentul cu Mw 5.2, cu rosu statiile folosite pentru evenimentul cu Mw 5.5, rosul inchis corespunde evenimentului 5.7, iar negru evenimentului 6.0 Mw. Culoarea gri indica statiile ce fac parte din rețeaua GPS actuala, in timp ce cu alt sunt indicate statiile care nu mai sunt in uz. Statiile GPS OROS si SOFI prezentate pe harta apartin rețetei EUREF.**

In ultima etapa a studiilor s-a realizat analiza spectrelor folosind date TEC diferentiale, definite ca diferenta masuratorilor sTEC dintre doua epoci satelitare successive. S-au estimat perioada si amplitudinea fluctuatiilor TEC diferentiale.

**Harti de TEC inaintea, in timpul si dupa producerea cutremurelor ; Elaborarea hartilor TEC diferentiale si a studiilor statistice si a tehnicilor de corelare pentru identificarea semnaturilor seismice in distributia TEC-urilor. Aplicarea algoritmilor AI (GA – Algoritm genetic si NN – rețele neuronale) pentru identificarea semnaturilor seismice in distributia TEC-urilor.**

Figura 2 (a, b, c si d) prezinta variatiile TEC diurne in intervalul de 30 de zile, anterior in timpul si pana la 7 zile dupa cutremur pentru toate evenimentele seismice examinate. In aceiasi

figura sunt indicate conditiile geomagnetice din timpul fiecărei perioade de studiu, descrise prin variații zilnice ale indezului geomagnetic Dst care cuprinde o măsură a variației în câmp magnetic datorată liniei ecuatoriale curente. Un index Dst de -50 sau inferior indică o perturbare la nivel de furtună geomagnetică.

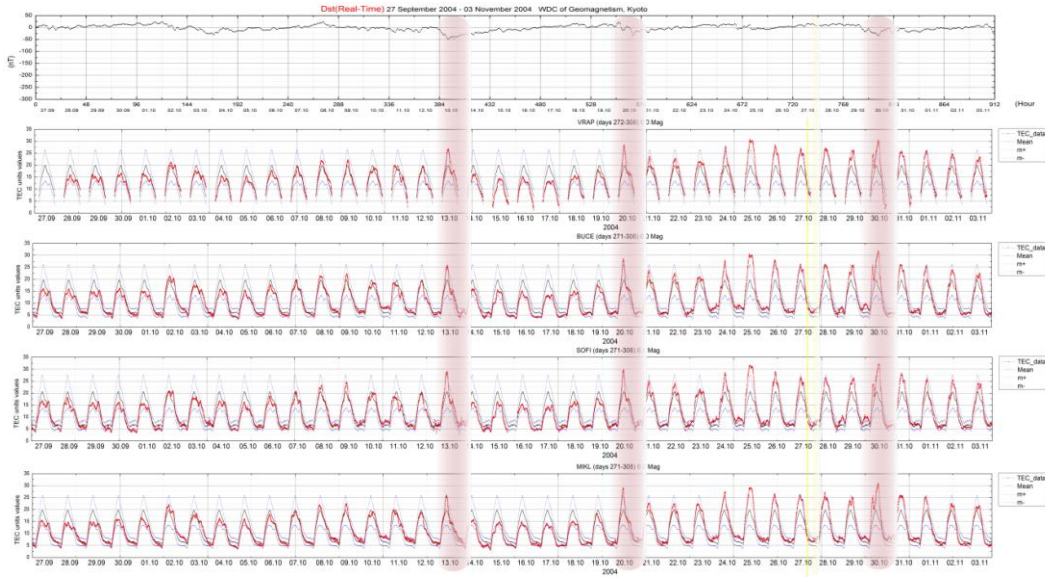
Asa cum se poate detecta din seriile de timp TEC din timpul celor 25 de zile precedente seismului crustal de 5.7 ce a avut loc pe 22 Noiembrie 2014 s-au detectat anomalii pozitive la circa 10 ore înaintea cutremurului doar la stațiile GPS localizate în interiorul zonei de preparare și mai apropiate de epicentru (VRAP, TINA, MARE, BICA, ROSU) (Figurile 2d și 3). Aceste anomalii au o durată scurtă de aproape 3 ore (7:00-10:00 UT) care confirmă [Pulinets and Boyarchuc, 2004], lucrare ce declară faptul că variațiile preseismice sunt comparativ de durată scurtă (circa 4-6 ore) față de efectele unei furtuni magnetice. Pe de altă parte perturbarile, pozitive sau negative ale variațiilor tec nu au fost regăsite la stațiile GPS poziționate în exteriorul zonei de preparare a seismului (ROSP, BUZE) în aceeași perioadă. Asadar, această perturbare pozitivă observată pe data de 22 Noiembrie 2014 ar putea fi asociată cu iminenta seismului, luând de asemenea în considerare apariția condițiilor geomagnetice normale din timpul aceleiași zile.

Figura 2c arată variațiile diurne prezente la stațiile GPS naționale în intervalul de 23 de zile înainte și în timpul zilei cutremurului de pe 6 Octombrie 2013. Asa cum se poate observa, valorile TEC sunt reduse în comparație cu valorile de bază înregistrate cu 3 zile în urma cutremurului de toate stațiile. Această consecință este atribuită apariției unei furtuni geomagnetice majore ce a început pe data de 2 Octombrie 01:55 UT, a avut faza inițială și principală în aceeași zi și faza de restabilire în timpul perioadei de 3 zile anterioare seismului (2-5 Octombrie). Întrucât variabilitatea ionosferică indusă de activitatea seismică este în general inferioară decât variațiile din timpul furtunilor geomagnetice, este foarte probabil că orice anomalie la nivelul datelor TEC asociată cu seismul pe durata furtunii 2-5 Octombrie să fie umbră de variațiile din timpul furtunii.

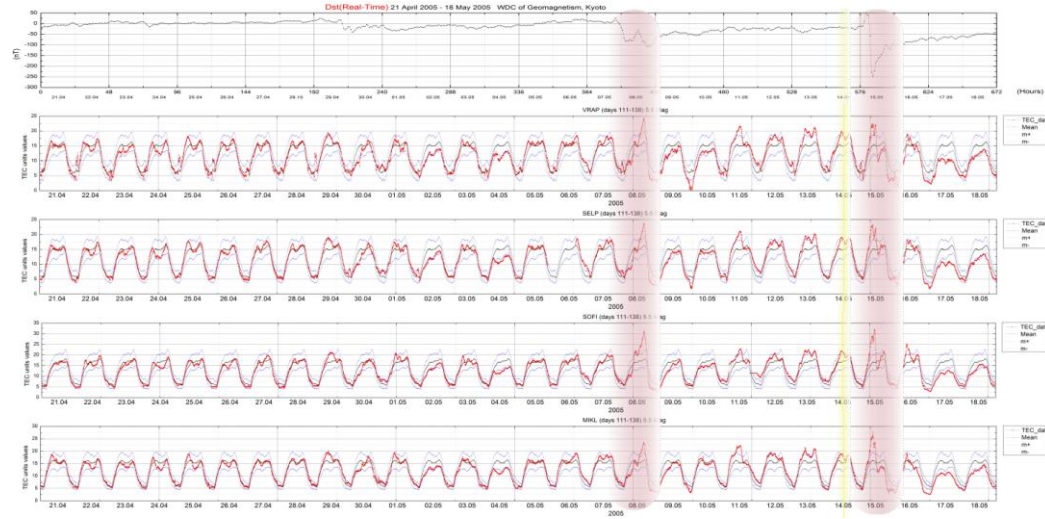
Figura 2b prezintă variațiile TEC zilnice din timpul lunii precedente seismului de adâncime cu  $M_w = 5.5$  de pe data de 14 Mai 2005, ca și indexul geomagnetic Dst observat zilnic. Asa cum rezultă din valorile indexului Dst o furtună geomagnetică puternică a avut loc cu 6 zile înainte de seismul. Faza inițială a furtunii a început la 19:20 UT pe 7 Mai și a fost urmată de faza principală de pe 8 Mai și de faza de restabilire care a durat de pe 9 până pe 13 Mai, cauzând observarea anomaliilor mari, de lungă durată la toate stațiile GPS. Prin urmare, nici o anomalie similară evenimentului seismic precedent nu a putut fi detectată.

Examinarea variațiilor TEC obținute de stațiile GPS în intervalul de 30 de zile anterior cutremurului adânc de  $M_w = 6$  ce a avut loc pe 26 Octombrie 2004 indică o anomalie TEC pozitivă ce a parut zilnic în ultimele 6 zile dinaintea seismului cu durată mai mare de 6 ore (Figura 2a). Deși nu s-a înregistrat nici o furtună geomagnetică în acea perioadă, a fost observată o secvență de erupții solare C-, M- (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/2004/>, NOAA, Space Weather Prediction Center) ce pot fi considerate parțial responsabile pentru creșterea zilnică a valorilor TEC [Yasyukevich, 2013]. Asadar nu a fost posibil să se detecteze nici o deviere TEC

indusa de catre cutremur. O alta posibila cauza a acestei descoperiri ar putea fi faptul ca seismul, in ciuda magnitudinii mari a fost localizat la mare adancime. Potrivit [Yang et al , 2011] si [Le et al, 2011], ce au studiat din punct de vedere statistic anomalile ionosferice anterioare unui cutremur folosind diverse metode, anomalile inregistrate inaintea seismelor de adancime sunt de intensitate si rata de ocurenta scazute.



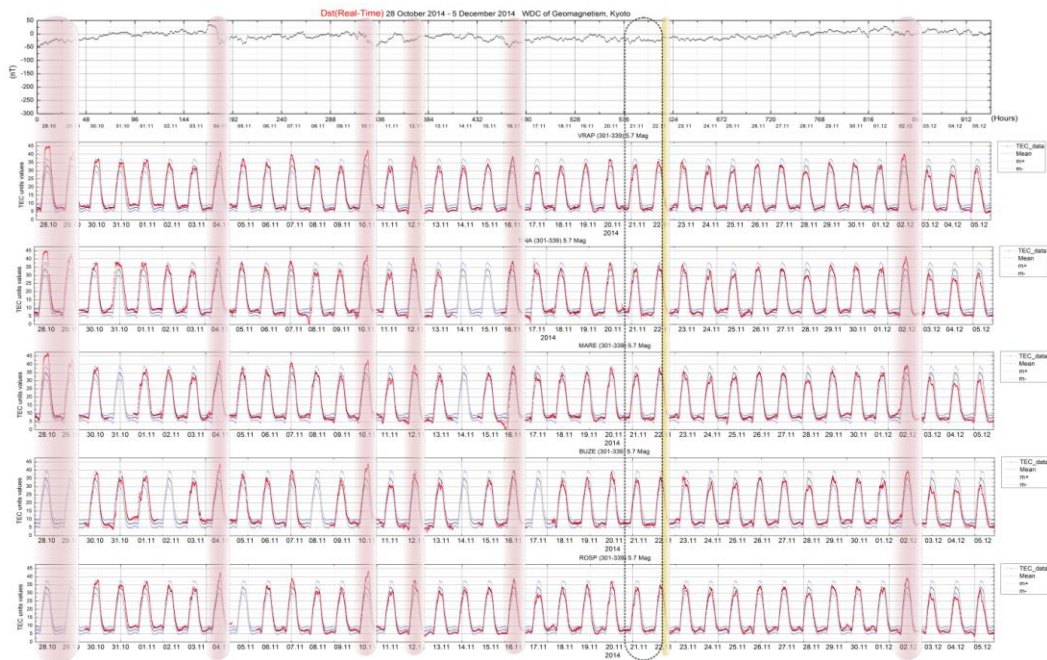
a.



b.



c.

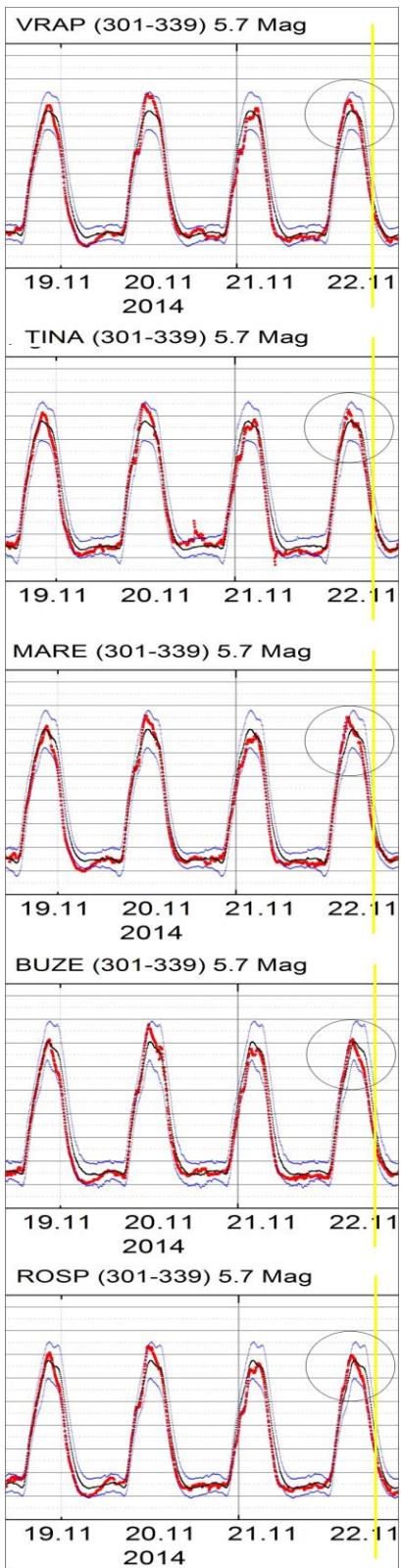


d.

**Figura 2- vTEC diurne (rosu) si limitele superioare si inferioare corespondente (negru) fixate la  $m \pm 1.34\sigma$  sunt prezentate in cazul statiilor GPS luate in calcul cu 30 de zile inainte, in timpul si pana la 7 zile dupa cele 4 evenimente seismice examinate. Zonele umbrite cu roz arata perioadele anormale dein punct de vedere geomagnetic iar linia verticala galbena indica momentul cutremurului.**

A devenit evident ca devierile TEC de la starea normala care ar putea fi legate de seism au fost identificate numai in cazul cutremurului crustal  $M_w = 5.7$  de pe data de 22 Noiembrie 2014 la aproape 10 ore inaintea evenimentului si int timpul unor conditii geomagnetice normale, spre deosebire de celelalte evenimente seismice care au fost ori situate la adancime (27 Octombrie

2004) ori au avut magnitudinea mica si perioada de preparare desfasurata in timpul unor furtuni geomagnetice majore (6 Octombrie 2013, 14 Mai 2005). In acest scop si pentru a se obtine o incredere mai mare si o confirmare in cazul asocierii anomaliiilor TEC observate pe 22 Noiembrie 2014 o data cu evenimentul seismic de  $M_w = 5.7$  am aplicat 2 metode aditionale, cross-corelarea si analiza spectrelor.



**Figura 3 – La fel ca in figura 2, dar cu 3 zile inainte si in timpul seismului de pe 22 Noiembrie 2014**



Mai intai am corelat valorile TEC inregistrate la cea mai apropiata statie seismica (VRAP) in perioada 20-22 Noiembrie 2014 cu toate celelalte statii. Coeficientul de corelare a fost calculat pentru fiecare dintre aceste 3 zile in 4 intervale separate 00-24, 00-08, 09-16 si 17-24 ore (Tabelul 2). Dupa cum se poate observa chiar daca valorile coeficientului de corelare la nivelul intregii zile sunt mari si nu prezinta modele de intrerupere, analiza intervalelor de 8 ore (mai ales pentru intervalul 17-24h UT, ce se desfasura pe timp de noapte avand in vedere timpul local) arata corelari scazute, indeosebi in ziua dinaintea cutremurului (21 Noiembrie 2014). De vreme ce anomaliiile pe care le cautam la un seism de magnitudine medie nu pot fi substantiale si pot fi influentate de variabilitatea din timpul zilei, tindem sa credem ca corelarile mici descoperite pe timpul noptii ar putea fi intr-un fel conectate la activitatea seismica din interiorul zonei epicentrale.

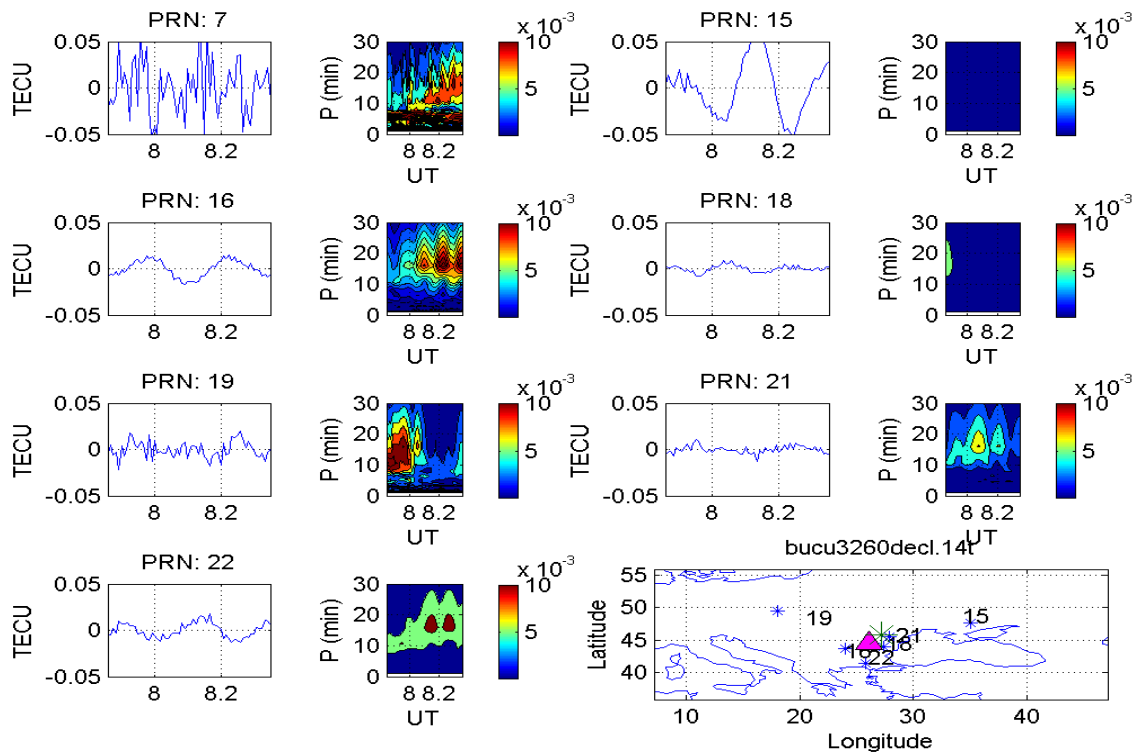
Intr-adevar, corelarile inregistrate la toate statiile in afara de TINA arata in linii mari o descrestere a corelarii odata cu distanta de la epicentru. Faptul ca statia TINA care este cea mai apropiata de VRAP prezinta cele mai mici valori ale coeficientului de corelare in loc de cele mai mari asa cum era de asteptat se datoreaza cel mai probabil problemelor tehnice ale statiei la acel timp care au condus la valori TEC incorecte.

Tabelul 2 Valorile coeficientului de corelare dintre statia VRAP si celelalte stati in ordinea distantei de la VRAP, in timpul a 4 intervale de timp: orele 00-24, 00-08, 09-16 and 17-24 pentru seismul de pe 22 Noiembrie 2014, 19:14:17 UT.

GPS STATI ONS	24h correl. with VRAP			0-8h correl. with VRAP			9-16h correl. with VRAP			17-24h correl. with VRAP		
	20 Nov.	21 Nov.	22 Nov.	20 Nov.	21 Nov.	22 Nov.	20 Nov.	21 Nov.	22 Nov.	20 Nov.	21 Nov.	22 Nov.
TINA	0.997	0.995	0.997	0.998	0.997	0.998	0.995	0.995	0.998	0.691	0.360	0.942
ROSU	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	0.998	1.000	0.972	0.920	0.962
TUDO	0.992	0.975	0.999	0.992	0.997	0.999	0.972	0.898	0.999	0.887	0.854	0.946
BUCE	0.999	0.999	0.997	0.998	0.999	0.996	0.998	0.998	0.999	0.962	0.863	0.956
BICA	0.999	0.999	0.999	0.996	0.996	0.998	0.999	0.998	1.000	0.981	0.873	0.981
MARE	0.998	0.998	0.997	0.998	0.995	0.997	0.995	0.993	0.998	0.946	0.875	0.957
COTI	0.997	0.998	0.996	0.996	0.999	0.994	0.993	0.995	0.997	0.956	0.862	0.963
HIST	0.998	0.995	0.998	0.998	0.994	0.997	0.997	0.992	0.998	0.981	0.929	0.959
MALI	0.997	0.995	0.996	0.997	0.994	0.998	0.994	0.987	0.997	0.972	0.777	0.832
ROSP	0.997	0.996	0.997	0.991	0.994	0.993	0.997	0.992	0.996	0.956	0.919	0.967
BUZE	0.992	0.995	0.990	0.984	0.992	0.982	0.977	0.992	0.990	0.943	0.879	0.965

In etapa urmatoare, s-a realizat Analiza spectrelor cu ajutorul valorile sTEC diferentiale estimate in cazul directiei de propagare dintre receptoarele apropiate de epicentru BUCU si BACA si mai multi sateliti trecand pe aproape si deasupra zonei de preparare a seismului in timpul zilei cand au fost detectate mari anomalii TEC (22 Nov. 2014) (Figure 2d si 3). In figura

4 pot fi identificare fluctuatii sinusoidale sTEC de perioada mare in acelasi timp in care au fost notate anomalile TEC de la evenimentul 5.7 (7-10 UT) pentru toti satelittii, avand perioada de oscilare in jur de 10-20 minute. Aceste rezultate confirma faptul ca anomalile TEC observate in cazul evenimentului seismic de 5.7 Mw se pot produce prin penetrarea Undelor Gravitationale ale Atmosferei (AGW) in ionosfera, asa cum este descris de teoria de imbinare Litosfera-Atmosfera-Ionosfera. Alti autori au observat de asemenea semnale radio VLF/LF preseismice cu directia de propagare destul de aproape de epicentre incat sa aiba perioade similare de 10-20 min [Hayakawa, 2011], [Rozhnoi et al, 2012].



**Figura 4 – Fluctuatii ale valorilor TEC diferentiale obtinute din masuratorile inregistrate de 7 sateliti trecand pe deasupra zonei de interes in timpul celor mai mari anomalii TEC observate pe date de 22 Nov. 2014 la statiile GPS din apropierea epicentrului. Este aratata de asemenea functia spectrala a amplitudinii normalizate. Harta indica numarul si pozitia satelitilor IPP (cu asterisc albastru), pozitia receptorului GPS de la statia BUCU (triunghi roz) si epicentrul seismului (cu asterisc verde).**

**In afara de cutremurele din Romania, s-au studiat si 3 cutremure din Europa cu Mw>6.0.**