

ZAZNAVANJE ZUNAJTROPSKIH CIKLONOV IZ SEVERNEGA ATLANTSKEGA OCEANA S SEIZMOGRAFI DRŽAVNE MREŽE POTRESNIH OPAZOVALNIC

Recording of Extra-Tropical Cyclones from the North Atlantic at the Seismic Network of the Republic of Slovenia

Izidor Tasič* UDK 550.348.098.33:551.515.2

Povzetek	Abstract
Oktober 2013 je zunajtropski ciklon, ki se je razvil iz severnega Atlantskega oceana, v državah severozahodne Evrope zahteval smrtne žrtve in povzročil tudi večjo gmotno škodo. Nekatere njegove faze smo lahko z merilnimi instrumenti na državni mreži potresnih opazovalnic (DMPO) spremljali s seizmičnim signalom, ki ga imenujemo primarni mikrosezem. V članku opisujemo izvor primarnega mikrosezema in vpliv zunajtropskih ciklonov, ki pozimi nastajajo v severnem Atlantskem oceanu, na povečan signal primarnega mikrosezema.	In October 2013, the extra-tropical cyclone formed in the western Atlantic caused huge material damage in several countries of northwestern Europe, and deaths as well. The Seismic Network of the Republic of Slovenia monitored some of its phases by recording a seismic signal called primary microseism. This article describes the origin of the primary microseism and the impact of extra-tropical cyclones that occur in the winter in the North Atlantic, on the increased signal of the primary microseism.

Uvod

V severnem Atlantskem oceanu nastane pozimi vsako leto več kot deset zunajtropskih ciklonov z orkanskim vetrovi (Hanafin in drugi, 2012). Posledice teh ciklonov so lahko katastrofalne ne le za prebivalce območij, ki ležijo neposredno ob severnoatlantski obali, temveč tudi za območja v notranjosti Evrope. Tako sta na primer viharja Lothar in Martin konec decembra 1990 povzročila smrtne žrtve ter zelo veliko gmotno škodo ne le v Franciji, temveč tudi v južni Nemčiji in Švici. Zaradi teh viharjev je umrlo 80 ljudi, od tega v Franciji 44, v južni Nemčiji 17 in Švici 13, gmotna škoda pa je presegla nekaj milijard evrov (Bresch in drugi, 1999). Obravnavanje dinamike takih neviht je vedno izziv, saj analize temeljijo na veliki množici različnih podatkov, pridobljenih s sistemi daljinskega zaznavanja iz različnih virov, in sicer od satelitskih podatkov do podatkov z morskih boj z različnimi merilnimi instrumenti. Eden izmed na prvi pogled nenavadnih

podatkovnih virov so tudi seizmični podatki, izmerjeni s seizmografii. To so podatki o povečani intenziteti primarnega mikrosezema, ki je posledica vpliva viharja na valovanje ob obalah (Hanafin in drugi, 2012).

Osnovni namen mreže potresnih opazovalnic je zaznavanje potresov. Nihanje tal ob potresu, ki ga seizmografii zaznajo na posamezni potresni opazovalnici, je vhodni podatek za opredeljevanje potresnih parametrov. Ob močnejšem potresu s pomočjo podatkov iz več opazovalnic omogočimo hitro obveščanje pristojnih služb in javnosti o lokaciji nadžarišča ter magnitudi potresa. Občutljivi instrumenti na potresnih opazovalnicah lahko merijo tudi nihanje tal zelo šibkih potresov, ki jih ljudje s svojimi čutili ne moremo zaznati. Ti potresi, ki ne povzročajo škode, so pomemben vir informacij za analizo seizmotektonskih značilnosti potencialnih aktivnih prelomov na opazovanem območju. Na kakovost meritev pri merjenju šibkih signalov potresa vplivata seizmični šum drugih virov in instrumentalni šum seizmoloških merilnih instrumentov. Sodobni seizmološki sistemi so zelo kakovostni, zato meritev pogosto ne vsebuje instrumentalnega šuma, ki je posledica delovanja komponent seizmološke aparature, temveč se kot šum ozadja pojavi le

* mag., Ministrstvo za kmetijstvo in okolje, ARSO,
Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska cesta 47, Ljubljana,
izidor.tasic@gov.si

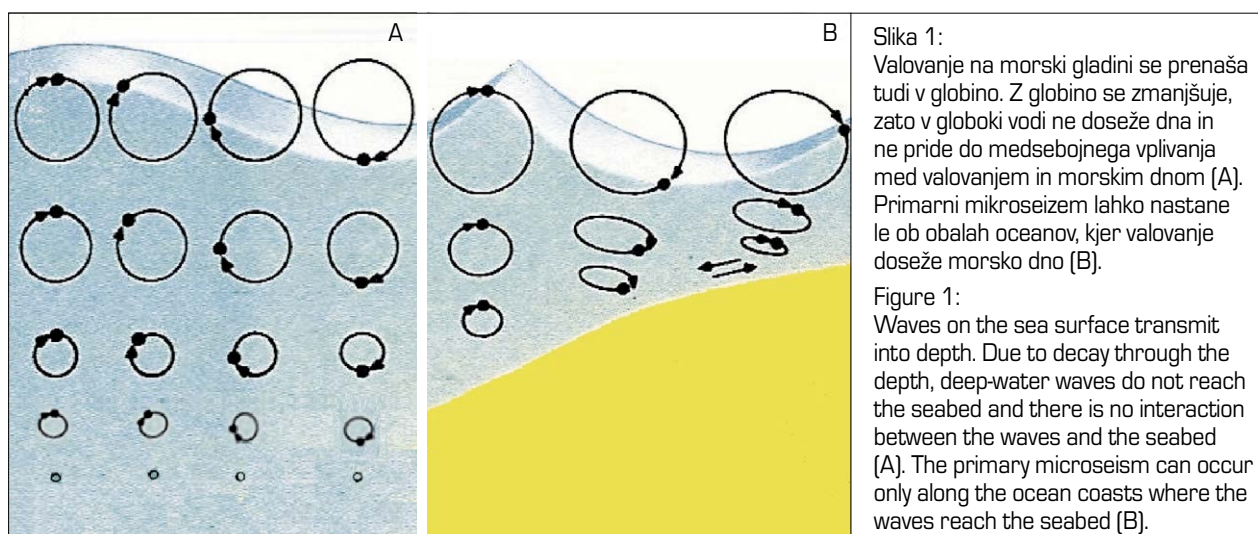
nenehno, bolj ali manj šibko nihanje tal. Takšnemu šibkemu nihanju tal pravimo tudi seizmični nemir. Seizmični nemir ali seizmični šum je zelo splošen izraz, saj z eno besedo opiše vsa nihanja tal, ki niso posledice potresa. Izvori teh nihanj so različni, saj je lahko vpliv vetra na drevesa ali zgradbe, izvor pa so lahko tudi morski valovi, ki udarjajo ob obalo, industrijski stroji, avtomobili in vlaki ali človeška hoja. Zaradi te raznolikosti opredelitev izvorov seizmičnega nemira ni lahka, saj meje frekvenčnih območij niso diskretne, temveč se pogosto prekrivajo, zato lahko seizmični nemir razdelimo na dve frekvenčni območiji z mejo pri enem Hz. Nemir nad to mejo opredelimo za visokofrekvenčen, pod njo pa za nizkofrekvenčen.

Včasih pa lahko obravnavamo seizmični nemir kot vir podatkov o izvoru ali o geološki zgradbi. V teh primerih je izvor signala časovno in prostorsko omejen in ni posledica potresa. Sem uvrščamo nihanje tal, ki ga poznamo kot primarni mikrosezem. V Sloveniji vplivajo na intenzivnost primarnega mikrosezema predvsem zunajtropski cikloni v severnem Atlantskem oceanu.

Primarni mikrosezem

V seizmologiji z besedno zvezo *primarni mikrosezem* opisujemo tisto nenehno šibko tresenje zemeljskega površja, ki ima svoj izvor v valovanju oceanov v bližini obal. To je že leta 1904 ugotovil eden izmed pionirjev seizmologije Emil Wiechert. Primarni mikrosezem nastane, ko oceanski valovi zadevajo ob morsko dno in tako prenašajo energijo valovanja na trda tla (slika 1). Primarni mikrosezem se razvije tam, kjer je globina vode manjša od polovice valovne dolžine morskih valov (Bromirski in drugi, 2005), zato ima ta tip potresnih valov enako periodo kot valovanje oceanov ob obalah. Študije seizmičnega nemira po svetu so pokazale, da primarni mikrosezem zaznavajo občutljivi seizmološki instrumenti na potresnih opazovalnicah, ki so razporejene po vsem svetu. To velja tudi za take lokacije, ki so globoko v notranjosti celin in so najbolj oddaljene od obal. Petersonov model najnižjega seizmičnega nemira iz leta 1993 (Peterson, 1993) kot

tudi novejši model GSN najnižjega šuma (Berger in drugi, 2003) imata na periodah med 10 in 30 sekundami izrazit lokalni maksimum, ki predstavlja povečan seizmični nemir. Pojavlja se pri periodah približno 14 sekund, in sicer pri modelu GSN pri periodi 13,9 sekunde, pri Petersonovem modelu pa pri 15,6 sekunde. Na tem območju občutljivi seizmografi zaznavajo v povprečju prevladujočo periodo nihanja tal. Iz tega sklepamo, da valovi v oceanih s periodo približno 14 sekund spremenijo v povprečju največ svoje energije v nihanje tal. Na velikost valov vpliva več dejavnikov, in sicer hitrost vetra in njegovo trajanje, velikost kontaktne površine morske gladine ter začetno stanje morske gladine. Če je območje morske površine, nad katero deluje veter, dovolj veliko, morje dovolj globoko in na tem območju ni nobene mejne ploskve, kot je na primer obala, ki bi ovirala veter, lahko viharji z močnimi vetrovi ustvarijo zelo velike valove. S pomočjo meritev iz satelitov so ocenili, da je pri neurju Quirin, ki je zajelo severni Atlantski ocean februarja 2011, višina valov preseгла 20 metrov (Hanafin in drugi, 2012). Februarja 1933 je tanker v Tihem oceanu zaznal višino vala 34 metrov. Valovom, ki jih ustvari veter, pravimo težni površinski valovi. Valovanje ne poteka le na površju, temveč se nihanje prenaša tudi v globino. V globoki vodi se nihanje širi v globino v obliki Rayleigjevih valov, pri čemer so orbite delcev vode krožnice, polmer orbite pa se eksponentno zmanjšuje z globino. Z globino se zmanjšuje tudi razlika v spremembi tlaka, ki nastane kot posledica valovanja, zato v globoki vodi valovanje ne doseže morskega dna (slika 1). Primarni mikrosezem torej ne more nastati na odprtem, globokem morju. Ko ti valovi pridejo v bližino obale, motnja doseže morsko dno in ustvari njegovo nihanje. Nastanejo površinski seizmični valovi, ki lahko prepotujejo velike razdalje, preden se nihanje konča. Medsebojno vplivanje med morskim dnom in morskim valovanjem je šibko, amplitude nihanj tal pa dosežejo največ nekaj mikrometrov, s periodami od trideset do nekaj desetih sekunde. Pri periodah, manjših od deset sekund, je signal primarnega mikrosezema prekrit s signalom sekundarnega mikrosezema, ki ima dvakrat manjšo periodo od primarnega, vendar je v signalu več energije. Izvor sekundarnega mikrosezema je razložil Longuet-Higgins (Longuet-Higgins, 1950).



Slika 1:
Valovanje na morski gladini se prenaša tudi v globino. Z globino se zmanjšuje, zato v globoki vodi ne doseže dna in ne pride do medsebojnega vplivanja med valovanjem in morskim dnom (A). Primarni mikrosezem lahko nastane le ob obalah oceanov, kjer valovanje doseže morsko dno (B).

Figure 1:
Waves on the sea surface transmit into depth. Due to decay through the depth, deep-water waves do not reach the seabed and there is no interaction between the waves and the seabed (A). The primary microseism can occur only along the ocean coasts where the waves reach the seabed (B).

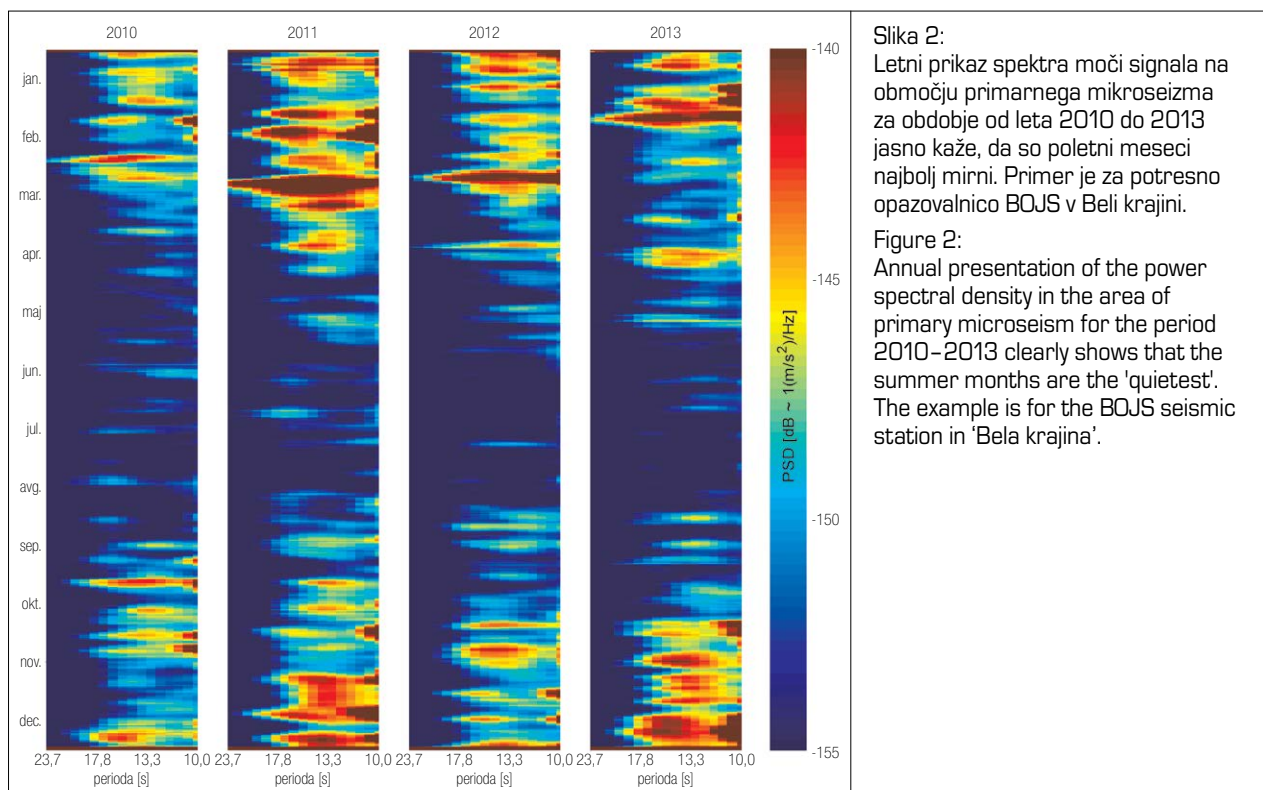
Vpliv zunajtropskih ciklonov na povečan primarni mikroseizem

Viharji na oceanih so izvor morskega valovanja, zato vplivajo na časovno omejene spremembe tako v frekvenčni porazdelitvi primarnega mikroseizma kot tudi v njegovi moči. Za območje Slovenije so vir povečanega primarnega mikroseizma zunajtropski cikloni, ki pozimi nastajajo v severnem Atlantskem oceanu na zemljepisni širini približno 45 stopinj (slika 2). Analize povečanega primarnega mikroseizma so zato zanimive za potencialne kazalnike energije, ki se ob viharjih prenaša na morsko dno. Ti signali so namreč posledica valovanja v oceanih na večjih površinah, merilniki na bojah pa omogočajo le točkovno meritev.

V nasprotju z izvorom potresa, pri katerem je žarišče krajevno omejeno in časovno natančno določeno, je izvor seizmičnega signala, ki nastane kot posledica orkanskih vetrov, teže natančno časovno in prostorsko uvrstiti. Območje, na katerem pride do interakcije med valovi in dnom, je zato slabo definirano. Tudi dinamika valovanja onemogoča preprosto prostorsko omejevanje izvora primarnega mikroseizma. Moč seizmičnega signala, ki je posledica zunajtropskih ciklonov, se povečuje zvezno, zato ni izrazitega začetka (npr. slika 5). Časovno uokvirjanje izvora takega signala je lahko le relativno glede na celoten signal. Dodatno nejasnost v izvoru primarnega mikroseizma lahko povzročijo cikloni, ki se zgodijo na različnih območjih hkrati. 13. februarja 2011 sta bili v severnem Atlantskem oceanu aktivni dve neurji, Paoline,

ki je bila jugovzhodno od Grenlandije in je ustvarila valove z višino do deset metrov, in Quirin, ki se je premikala južno od Nove Fundlandije (Hanafin in drugi, 2012) z valovanjem, ki je dosegalo višino približno 18 metrov.

15. februarja 2011 so hkrati kot povečano valovanje morja povečan mikroseizem zaznali tudi seizmografi na potresnih opazovalnicah v notranjosti Evrope. Največjo moč signala so zaznali okoli poldneva, kar sovpada z opazovanjem valovanja na bojah ob obalah zahodne Evrope (Hanafin in drugi, 2012). Povečan seizmični nemir so tudi v Sloveniji zaznali seizmografi državne mreže potresnih opazovalnic. Čeprav so seizmografi na potresnih opazovalnicah na slovenskem ozemlju že nekaj dni zaznavali povečano raven signala na širšem območju mikroseizma, predvsem pri periodi približno 16 sekund, so tega dne okoli tretje ure po UTC izmerili še povečan signal primarnega seizmičnega nemira na območju med 21 in 30 sekundami, z lokalnim vrhom pri periodi približno 23 sekund (slika 3). Ta seizmični signal je lokalni maksimum dosegel okoli poldneva. Časovno to sovpada s podatki, ki so bili predstavljeni pri analizi neurja Quirin (Hanafin in drugi, 2012). Slika 3 prikazuje spekter močnostne gostote seizmičnega nemira za ta dan ob različnih urah, in sicer ob polnoči ter ob 5. in 13. uri po UTC. Na zapisih opazimo vrh pri 23,4 sekunde, kar sovpada s podatki z boj. Iz podatkov lahko sklepamo dvoje, in sicer da dolgoperiodni primarni seizmični mikroseizem, zaznan v Sloveniji, sovpada z valovanjem ob evropskem delu atlantske obale, in da lahko na slovenskem ozemlju zaznamo tudi signal, ki je posledica valovanja v severnem Atlantiku s periodo valov približno 30 sekund. To je tudi perioda, ki nam določa najnižjo mejo detekcije primarnega mikroseizma na DMPO.



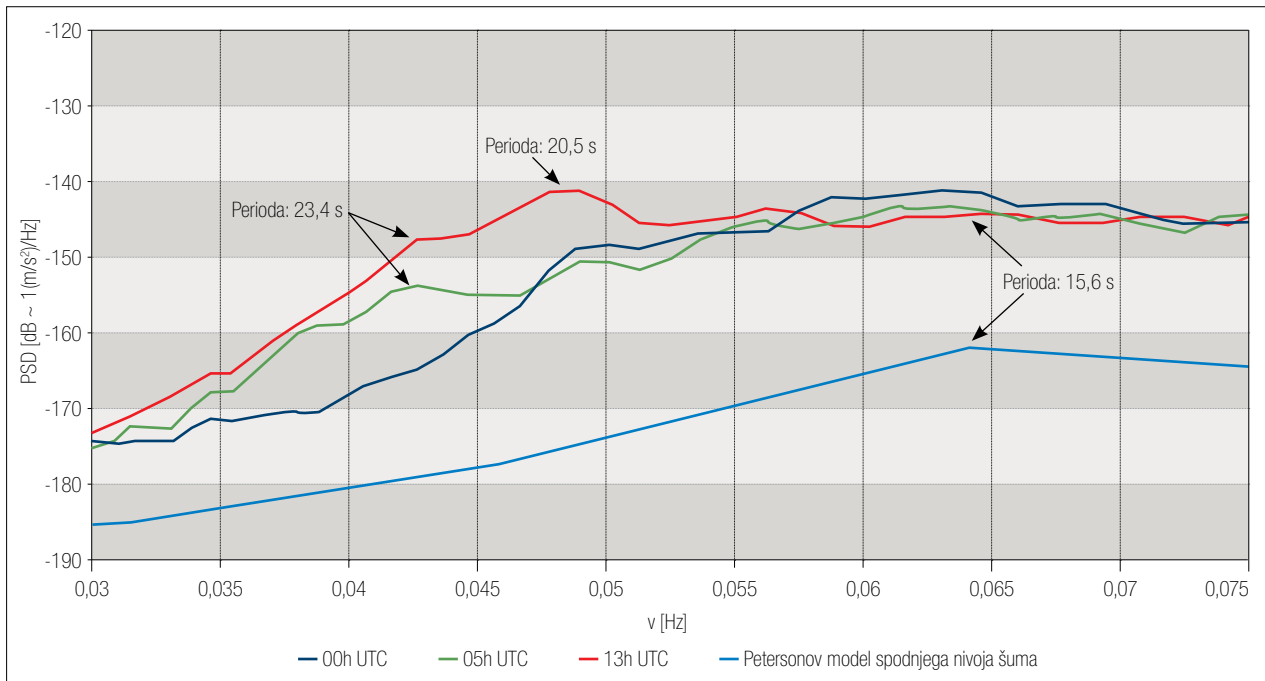
Slika 2: Letni prikaz spektra moči signala na območju primarnega mikroseizma za obdobje od leta 2010 do 2013 jasno kaže, da so poletni meseci najbolj mirni. Primer je za potresno opazovalnico BOJS v Beli krajini.

Figure 2: Annual presentation of the power spectral density in the area of primary microseism for the period 2010–2013 clearly shows that the summer months are the 'quietest'. The example is for the BOJS seismic station in 'Bela krajina'.

Neurje Christian oktobra 2013

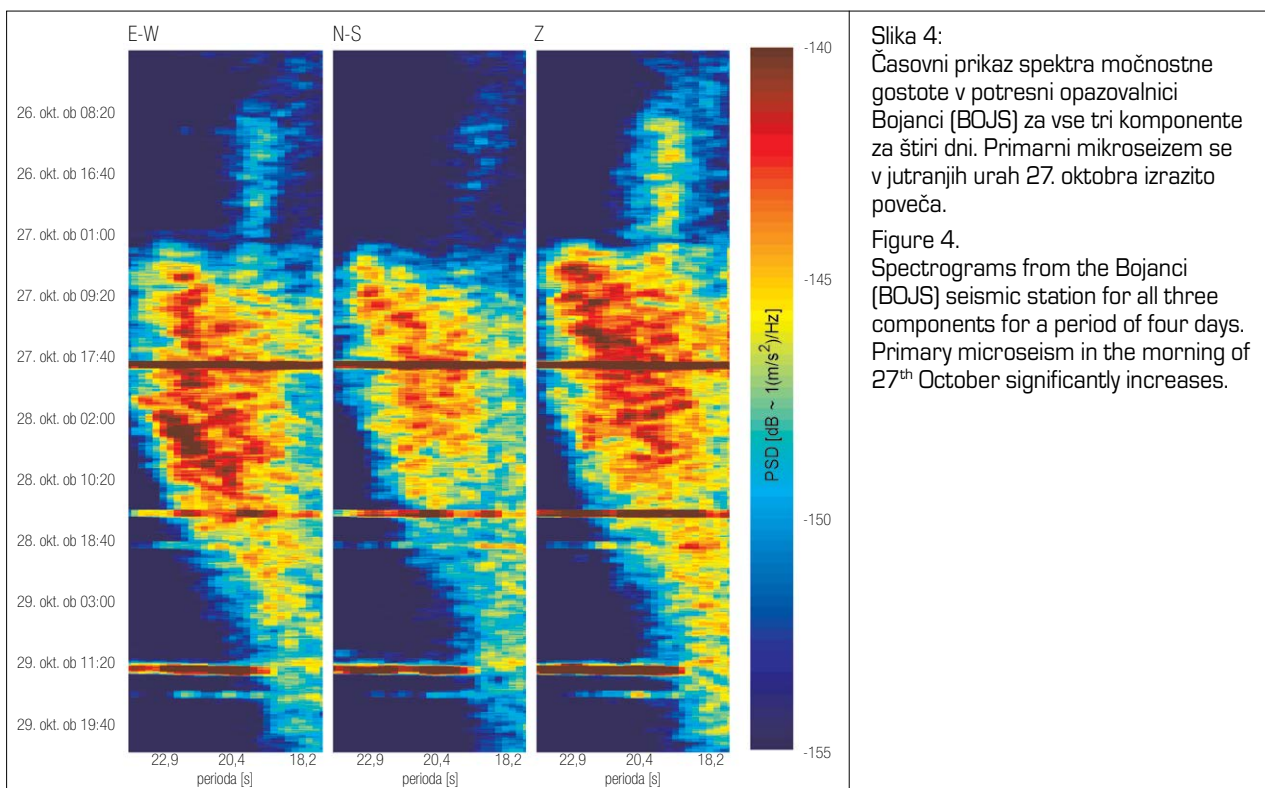
Neurje Christian oziroma neurje Sv. Jude (angl. St. Jude storm), kot so ta zunajtropski ciklon poimenovali v Veliki Britaniji, je zahtevalo vsaj 18 smrtnih žrtev. Neurje je nastalo 26. oktobra 2013 v severovzhodnem Atlantskem oceanu ob vzhodni obali Severne Amerike in je

ponehalo 31. oktobra (Wikipedija, 2014). Na svoji poti je prizadelo Veliko Britanijo, Francijo, Nizozemsko, Nemčijo, Dansko in tudi skandinavske države ter severozahod Rusije. V Veliki Britaniji je veter ponekod pihal s hitrostjo 159 km/h, na Nizozemskem so izmerili veter s hitrostjo več kot 148 km/h, na južnem Danskem pa so sunki vetra presegli hitrost 190 km/h.



Slika 3: Spekter moči signala: časovne spremembe v moči signala primarnega mikrosezima glede na periodo za 15. februar 2011 ob treh različnih urah

Figure 3: Power spectral density plot: temporal variations in the signal strength of the primary microseism on 15th February 2011 for three different hours.

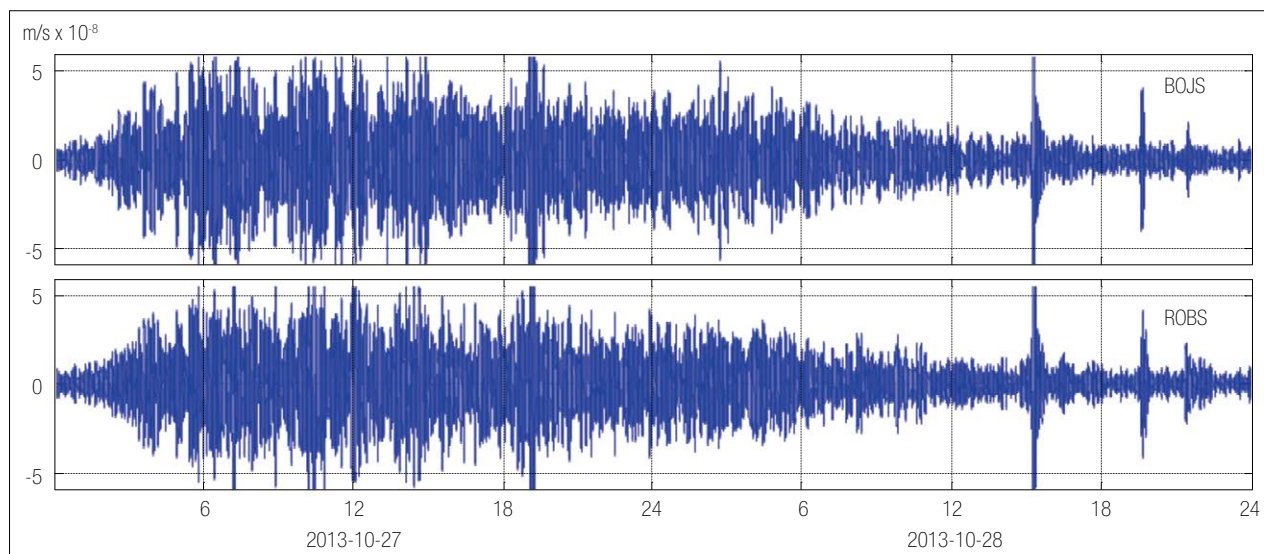


Slika 4: Časovni prikaz spektra močnostne gostote v potresni opazovalnici Bojanci (BOJS) za vse tri komponente za štiri dni. Primarni mikrosezim se v jutranjih urah 27. oktobra izrazito poveča.

Figure 4. Spectrograms from the Bojanci (BOJS) seismic station for all three components for a period of four days. Primary microseism in the morning of 27th October significantly increases.

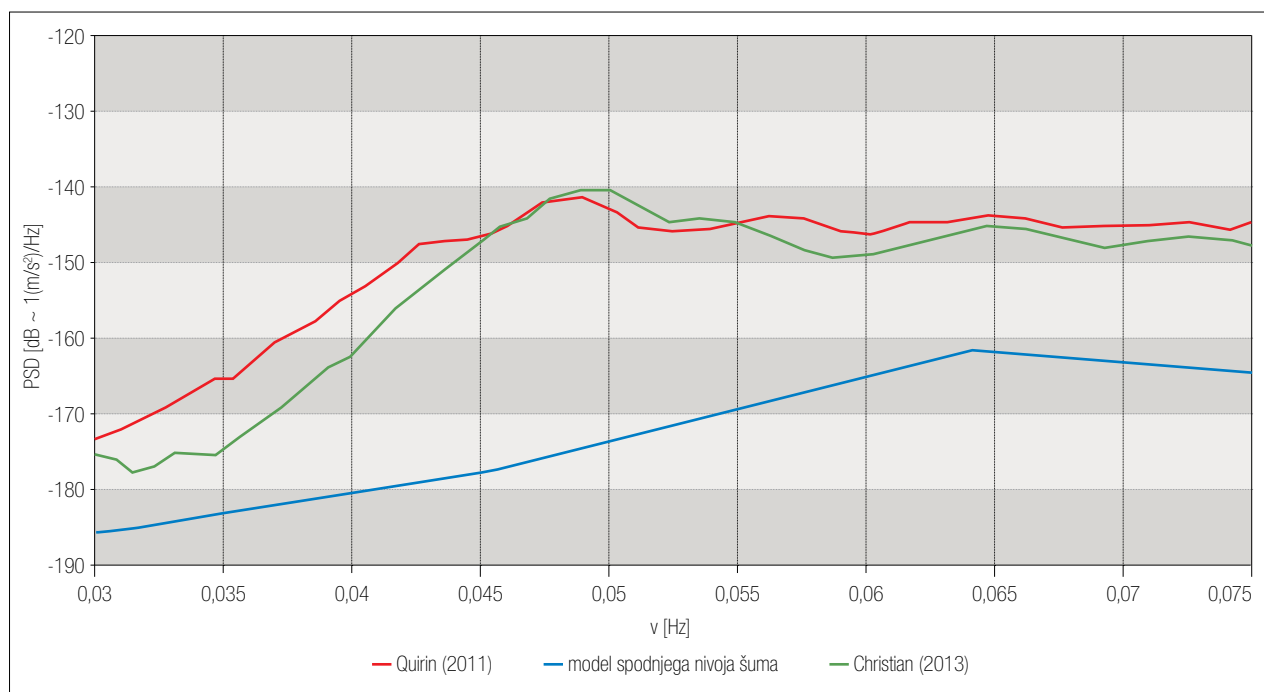
Zaradi tega neurja smo povečanje primarnega mikrosezima zaznavali tudi z merilnimi instrumenti na potresnih opazovalnicah v Sloveniji. Časovni prikaz spektra močnostne gostote za vse tri smeri (vzhod-zahod, sever-jug, vertikalna smer) za obdobje štirih dni je predstavljen s podatki iz potresne opazovalnice Bojanci z oznako BOJS (slika 4), vendar bi bila struktura signala podobna tudi za druge opazovalnice. V zgodnjih urah 27. oktobra so

merilni instrumenti na potresnih opazovalnicah DMPO zaznali izrazito povečan primarni mikrosezim, ki se je nato počasi zmanjševal na osnovno raven. S slike lahko razberemo tudi, da je na horizontalnih komponentah primarni mikrosezim izrazitejši v smeri vzhod-zahod, kot pa v smeri sever-jug, kar kaže na delno polarizacijo valovanja. Takšna polariziranost valovanja je značilnost površinskih seizmičnih valov. Na vseh treh slikah



Slika 5: Zapis vertikalnih komponent za 27. in 28. oktober v opazovalnici Bojanci (BOJS) in opazovalnici Robič (ROBS). Opazovalnici sta med seboj oddaljeni 158 kilometrov.

Figure 5. Record of vertical components for 27th and 28th October 2013 for the Bojanci (BOJS) and Robič (ROBS) seismic stations. The distance between them is 158 kilometers.



Slika 6: Primerjava moči signala za neurje Quirin 15. februarja ob 13. uri po UTC in neurje Christian 27. oktobra ob 4. uri po UTC kaže, da je pri neurju Christian manj prispevka dolgih period oziroma da je ta vihar ustvaril manj zelo velikih valov.

Figure 6. Comparison of the power spectral density for storms Quirin (15th February at 13 UTC) and Christian (27th October at 04 UTC) shows that the storm Christian less contributed to long periods, as this storm created less extremely high waves.

so izrazite kratkotrajne »motnje«, ki so si podobne na vseh treh smereh, prva pa se pokaže v poznih popoldanskih urah 27. oktobra. To so v resnici teleseizmi oziroma zelo oddaljeni potresi, ki v takih primerih pomenijo moteč signal. Analiza seizmičnega signala lahko poteka v časovnem ali frekvenčnem prostoru. Časovni zapis je na sliki 5, na kateri sta prikazani vertikalni komponenti za opazovalnici, ki sta med seboj oddaljeni 158 kilometrov. To sta opazovalnici BOJS v jugovzhodnem in opazovalnica ROBS v severozahodnem delu Slovenije. Ovojnicni seizmičnega signala sta zelo podobni. Amplituda signala se poveča v začetku 27. oktobra 2014, naslednji dan pa se počasi niža. Občasne kratke, časovno omejene povečane vrednosti signala predstavljajo teleseizmi, podobno kot je na sliki 2. V jutranjih urah 28. oktobra je neurje doseglo jug Velike Britanije, ga prešlo in popoldne pot nadaljevalo proti Severnemu morju. Zaradi kompleksnega izvora primarnega mikrosezma ne moremo uporabiti časovne analize signala, lahko pa si pomagamo z analizo f-k v frekvenčnem prostoru s podatki iz vseh opazovalnic v Sloveniji. Analiza, ki je bolj primerna za uporabo na dvodimenzionalnih, geometrijsko urejenih omrežjih potresnih opazovalnic, kar pa DMPO ni, nam kljub temu lahko pokaže precejšnje spremembe v zaznavanju signala v celotni mreži. Do izrazite spremembe pride 28. oktobra med 1. in 3. uro po UTC ter nato med 16. in 18. uro po UTC, kar bi lahko bilo povezano s prehajanjem neurja čez kopno. Več bi nam lahko povedali podatki z boj v Severnem morju, toda teh podatkov trenutno še nimamo.

Sklepne misli

Analiza primarnega mikrosezma je celovita in zapletena zaradi dejstva, da na raven ter obliko signala ne vpliva le intenzivnost neurja, temveč tudi njegova trajektorija ter drugi dejavniki, kot je na primer večje število neurij hkrati. Na sliki 6 je primerjava moči signala za neurje Quirin 15. februarja ob 13. uri po UTC in za neurje Christian 27. oktobra ob 4. uri po UTC. Primerjava pokaže, da je pri neurju Christian manj dolgih period oziroma da je ta vihar ustvaril manj zelo velikih valov.

Primarni mikrosezim, ki ga občutljivi seizmografi na kakovostnih potresnih opazovalnicah zaznavajo vsepovsod, tudi globoko v notranjosti celin, prinaša dodano vrednost k raziskavam takšnih neurij. To velja tudi zato, ker se število kakovostnih potresnih opazovalnic povečuje, izmenjava seizmičnih podatkov pa postaja vedno bolj preprosta. Nova spoznanja prinašajo tudi nova vprašanja, zato bodo nujne nadaljnje raziskave in celovite večdisciplinarne analize, da se bo potencial seizmičnih meritev pri analizi intenzivnosti neviht ustrezno uvrstil.

Viri in literatura

1. Hanafin, A. J., Quilfen, Y., Ardhuin, F., Sienkiewicz, J., Queffeuilou, P., Obrebski, M., Chapron, B., Reul, N., Collard, F., Corman, D., de Azevedo, B. E., Vandemark, D., Stutzmann, E., 2012. Phenomenal sea states and swell from a North Atlantic Storm in February 2011: a comprehensive analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* December 2012, Volume 93 (12), 1825–1832. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00128.1>.
2. Bresch, N. D., Swiss Re, 1999. Storm over Europe An underestimated risk, Swiss Re, Zürich, ipcc-wg2.gov/nj-lite_download.php?id=6598 (april 2014).
3. Bromirski, P. D., Duennebieer, F. K., Stephen, R. A., 2005. Mid-ocean microseisms, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 6, Q04009, doi: 10.1029/2004GC000768.
4. Berger, J., Bolton, H., Davis, P., Ekstrom, G., Hutt, C., 2003. The GSN Noise Model: Estimates of the Least Ambient Earth Noise From the IRIS Global Seismographic Network. American Geophysical Union, Fall Meeting 2003, Poster.
5. Peterson, J., 1993. Observations and modeling of background seismic noise. Open-file report 93-322, U. S. Geological Survey, Albuquerque, New Mexico.
6. Wikipedija [2014]. http://en.wikipedia.org/wiki/St._Jude_storm (april 2014).
7. Longuet-Higgins, M. S., 1950. A Theory on the origin of microseisms. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A.* 243: 1–35.