

Kako smo v Sloveniji na potresnih opazovalnicah zaznali 200-metrski cunami iz Grenlandije

Izidor Tasič*, Jurij Pahor*, Tamara Jesenko*

Povzetek

V drugi polovici septembra 2023 smo na vseh širokopasovnih potresnih opazovalnicah Slovenske Državne mreže zaznali netipičen zelo dolgo-periodni, ozkopasovni seizmični signal s periodo 92 sekund, ki je v naslednjih 6 dnevih počasi upadal. F–K analiza signala je pokazala, da prihaja valovanje iz smeri sever–severozahod glede na Slovenijo s hitrostjo 4,1 km/s. Naknadno smo ugotovili, da ga je zabeležila večina širokopasovnih potresnih opazovalnic v Evropi, njegova amplituda pa je upadala v smeri juga. Preliminarna lokacija je pokazala, da je izvor na obmorskem delu Grenlandije, oddaljen 3650 kilometrov od Ljubljane. Za primerjavo smo preverili podatke iz naših opazovalnic za obdobje od leta 2010 do danes, a enakega oziroma podobnega zapisa nismo zasledili. Imeli smo sicer nekaj hipotez, kaj bi bil lahko izvor nenavadnega signala, a šele v jeseni leta 2024 je v reviji Science izšel članek, ki je potrdil, da smo lokacijo dokaj natančno določili, izvor pa je bil cunami v fjordu Dickenson na Grenlandiji z ocenjeno velikostjo vala okrog 200 m.

Ključne besede: Grenlandija, fjord, plaz, cunami, dolgo-periodni signal

Keywords: Greenland, fjord, landslide, tsunامي, long-period signal

Uvod

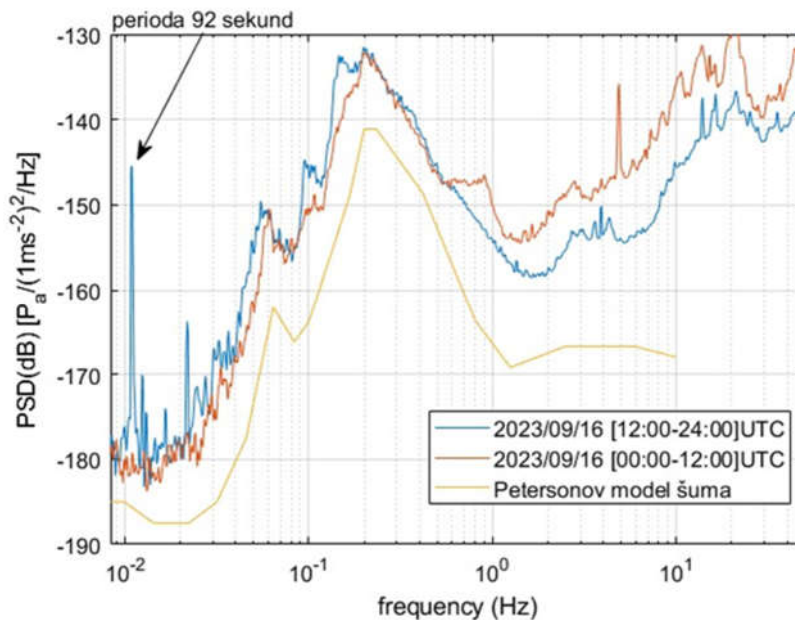
Osnovna naloga potresne opazovalnice je beleženje potresov. Potresne opazovalnice, ki so del Državne mreže potresnih opazovalnic na slovenskem ozemlju, so opremljene s sodobnimi širokopasovnimi seizmometri in pospeškometri (Tasič, 2018). S tako kombinacijo merilnikov so potresne opazovalnice sposobne beležiti tako močne kot šibke potrese. Šibki lokalni potresi, ki jih ljudje s svojimi čutili niti ne zaznamo, so pomemben vir podatkov za analizo potresnih značilnosti prelomov v opazovanem območju. Lahko pa so šibki signali tudi posledica oddaljenih potresov, ki jim pravimo teleseizmi, in katerih vrednotenje je pomembno za izdelavo geofizikalnega modela notranjosti Zemlje. Na kvaliteto beleženja šibkih signalov potresov vplivajo ostali seizmični signali, ki jih z eno besedo poimenujemo seizmični šum in niso posledica potresa (Tasič, 2015). Izvori seizmičnega šuma se prostorsko in časovno med seboj zelo razlikujejo, ravno tako se razlikujejo tudi po amplitudi in frekvenci nihanja tal. Seizmični šum na posamezni lokaciji je posledica različnih lokalnih, regionalnih in tudi globalnih virov. Med slednje spada tudi valovanje oceanov (Tasič, 2014). Danes se zavedamo, da se veliko zanimivih informacij skriva prav v tem šumu, zato tudi vse več raziskav temelji na parcialni analizi »nepotresnih« signalov. Z njihovo identifikacijo in poznavanjem njihove časovne dinamike poskušamo razumeti fizikalne pojave izvorov le-teh ter s tem določiti njihove značilnosti.

Na zapis potresa pa poleg seizmičnega šuma vplivajo tudi motnje in napake seizmološke merilne opreme, kar želimo čim prej identificirati in odstraniti. Ker zapisi motenj in napak opreme niso pogosti, so pa izredno raznoliki, se za njihovo identifikacijo uporabljajo različni postopki in matematična orodja. Eno od teh orodij so tridesetdnevni spektrogrami, ki jih lahko predstavimo dvo ali tri-dimenzionalno.

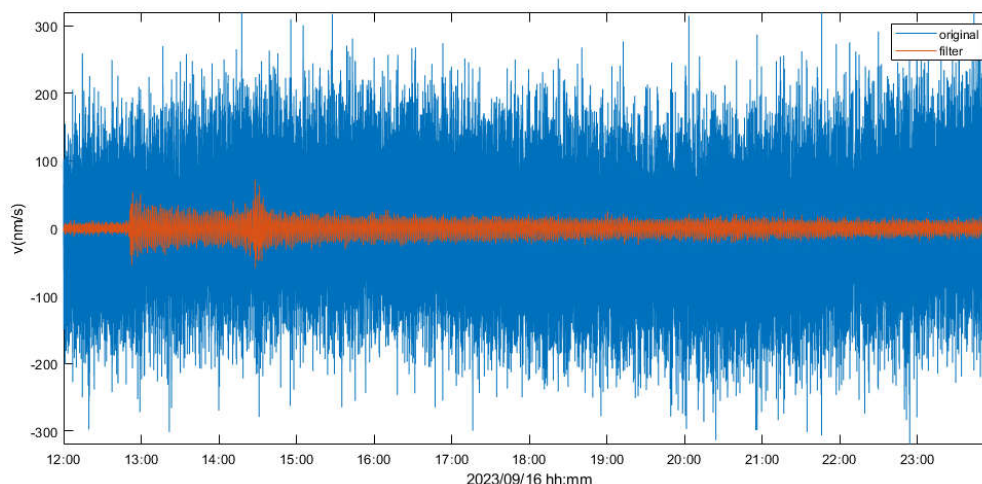
* Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana

Napaka ali kaj drugega?

V drugi polovici septembra 2023 smo pri analizi spektrogramov opazili netipičen signal pri periodi okoli 92 sekund, ki je izrazito odstopal od dosedanjih opazovanj (slika 1) in se je začel v popoldnaskem delu dneva (slika 2). Ker analiza spektrogramov poteka zaporedno po opazovalnicah, istočasno se analizirajo samo produkti spektrogramov iz ene opazovalnice (Tasič, 2016), je bila prva domneva o izvoru nenavadnega signala, da je to napaka na seizmološki merilni opremi ali njeni postavitvi. Napaka bi bila lahko posledica okvare seizmometra, labilne lege kabla seizmometra ali pa poškodbe betonskega seizmičnega podstavka. Vse te napake smo že imeli, a so bili odzivi v spektrih po naših dosedanjih izkušnjah drugačni. Signal pri periodi 92 sekund je počasi upadal skozi dan. Ker oddaljena kontrola seizmološke opreme na prvi opazovalnici ni pokazala odstopanj, smo nadaljevali analizo spektrogramov zaporedoma tudi na ostalih opazovalnicah. Presenetilo nas je, da je enak signal zabeležen na vseh slovenskih potresnih opazovalnicah s širokopasovnimi seizmometri!



Slika 1. Spektra seizmičnega signala na potresni opazovalnici BOJS za navpično komponento za 16. september 2023 po univerzalnem koordiniranem času (UTC). Spektra sta izračunana za dvanajst-urni niz podatkov, modra črta prikazuje spekter prvih dvanajst ur dneva, rdeča drugih dvanajst ur dneva, pri čemer je uporabljen univerzalni koordiniran čas (UTC), in se torej razlikuje za dve uri glede na lokalni čas. V "popoldanskem" dnevu spektra izrazito izstopa signal pri periodi 92 sekund. Za primerjavo je podan še Petersonov globalni model spodnje ravni seizmičnega šuma (zelena barva, Peterson, 1993) pod katerega v povprečju spekter seizmičnega signala ne seže.



Slika 2. Zapis nefiltriranega nihanja tal (modra barva) v navpični smeri in njegov filtriran zapis (rdeča). Filtriran je s prepustnim filtrom v frekvenčnem intervalu med 1/95 Hz in 1/25 Hz, za navpično komponento opazovalnice SKDS. Preliminarna analiza filtriranega signala je pokazala, da se je signal s povečano amplitudo v ozkem frekvenčnem pasu začel ob 12.51 po UTC in je nato počasi upadal. Dodatno povečana amplituda med 15. in 16. uro UTC je zapis oddaljenega potresa.

Neznani seizmični signal

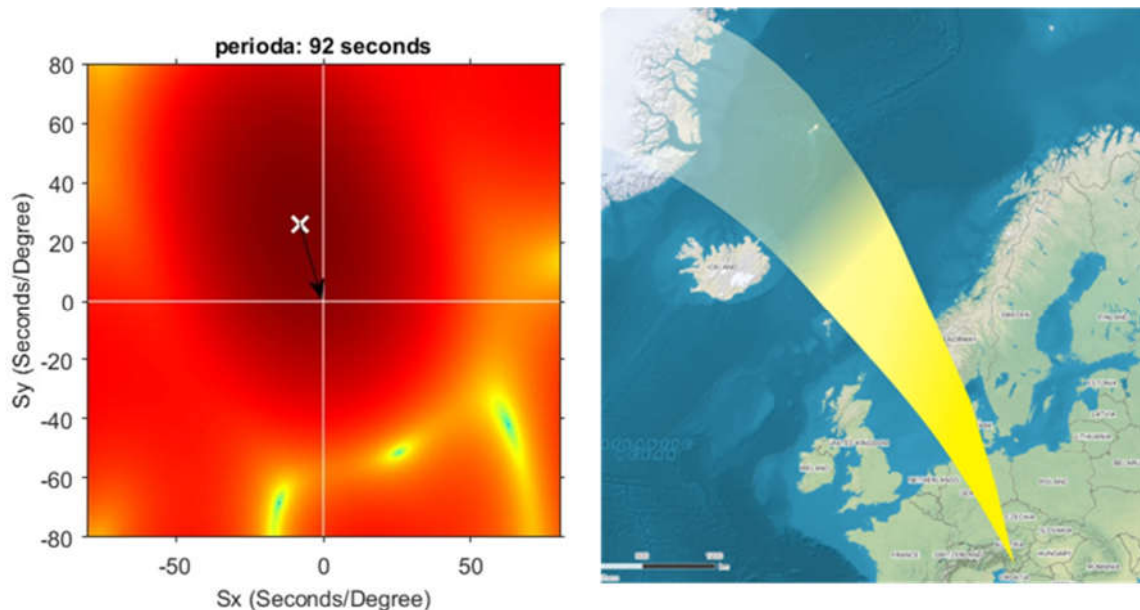
Signal s povečano amplitudo pri 92 sekundah, ki se je začel 16. septembra 2023 popoldne, pa niso zaznale le slovenske opazovalnice. Ko smo preverili zapise več tujih opazovalnic, smo naleteli na enak signal. Opazili pa smo, da je njegova amplituda pri opazovalnicah, ki se nahajajo južneje od Slovenije, manjša. Analiza pojava v prostoru frekvence in valovnega števila (t.i. F–K analiza, slika 3, levo) s podatki iz slovenskih opazovalnic je pokazala, da valovanje s periodo 92 sekund prihaja iz smeri sever–severozahod s hitrostjo približno 4,1 km/s.

Ker je bil v tem času na Islandiji aktiven vulkan, smo sprva domnevali, da je izvor signala magmatski. Znano je, da lahko magma v določenih pogojih v notranjosti Zemlje tvori monokromatski dolgoperiodni signal, ki lahko traja tudi leta (Tasič, 2022). Toda že prve analize so pokazale, da je izvor dlje, nekje v okolici jugovzhodnega dela Grenlandije (slika 3, desno). Tam vulkanske aktivnosti ni.

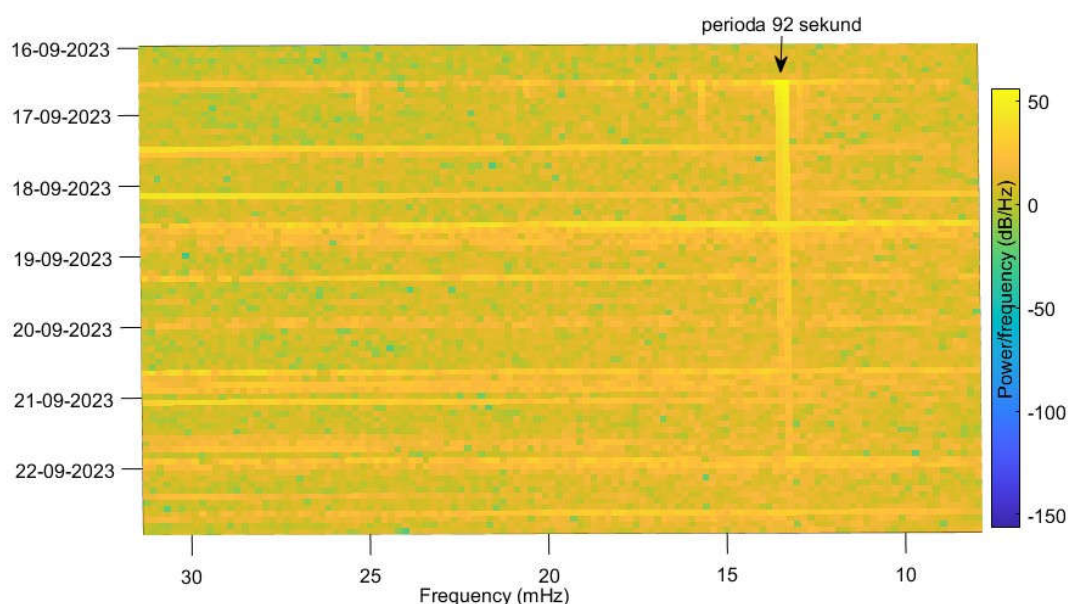
Na spektrogramu (slika 4) vidimo, da lahko signalu pri tej periodi sledimo skoraj šest dni. S posebnim algoritmom smo preiskali seizmogramе vse do leta 2010, če je bil še kdaj zabeležen podoben signal v bližini 92-sekundne periode, a tega nismo zasledili.

Pri analizi seizmičnih zapisov nekaterih potresnih opazovalnic iz Evrope smo naleteli na dve opazovalnici, ki sta med seboj oddaljeni okoli 3120 kilometrov, katerih seizmični zapisi so bili opazno drugačni od ostalih (slika 5). To pomeni, da sta žariščni mehanizem zabeležili drugače in lahko z njuno pomočjo ocenimo usmerjenost žariščnega mehanizma, če ju po površini Zemlje med seboj povežemo (slika 6).

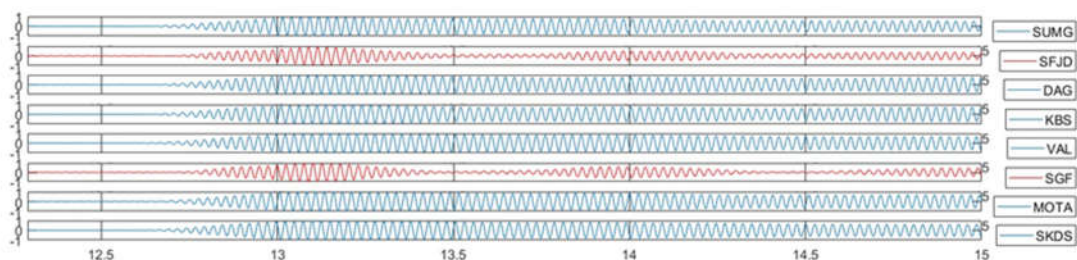
Kaj bi bil izvor teh zanimivih zapisov na seizmogramih, si dejansko nismo uspeli točno predstavljati, mogoče tudi zato, kar nismo najbolj zaupali v natančnost naše lokacije. Nadalje smo domnevali, da je se je nekje utrgala ledena gora, ki je nasedla na enem robu v napol zaprtem fjordu ter zato nekaj časa nihala.



Slika 3. Levo: Analiza dogodka v prostoru F–K (prostor frekvence in valovnega števila), ki so ga 16. septembra 2023 med 12. in 13. uro po UTC zaznale potresne opazovalnice v Sloveniji pokaže, da je valovanje pri periodi 92 sekund prihajalo do Slovenije iz smeri sever–severozahod s povprečno hitrostjo 4,1 km/s. Kljub temu, da geometrija postavitve slovenskih opazovalnic ni idealna za analizo v prostoru F–K, dobimo z njo še vedno zadovoljivo oceno smeri prihoda potresnih valov v Slovenijo in njihovih hitrosti. Desno: Že prve analize oddaljenosti izvora signala so kazale na to, da aktiven vulkan na Islandiji ne more biti vzrok za seizmični signal s periodo 92 sekund, na jugovzhodnem delu obale Grenlandije pa vulkanov ni.



Slika 4. Spektrogram seizmograma iz Bojancev (BOJS) za sedemdnevno obdobje, prikazan na frekvenčnem območju med 0,079 Hz in 0,035 Hz (oziroma med periodama 125 sekund in 28 sekund). Signal lahko opazujemo še vse do 22. 9. 2024, kar pomeni, da so tla v Sloveniji nihala vsaj 6 dni.



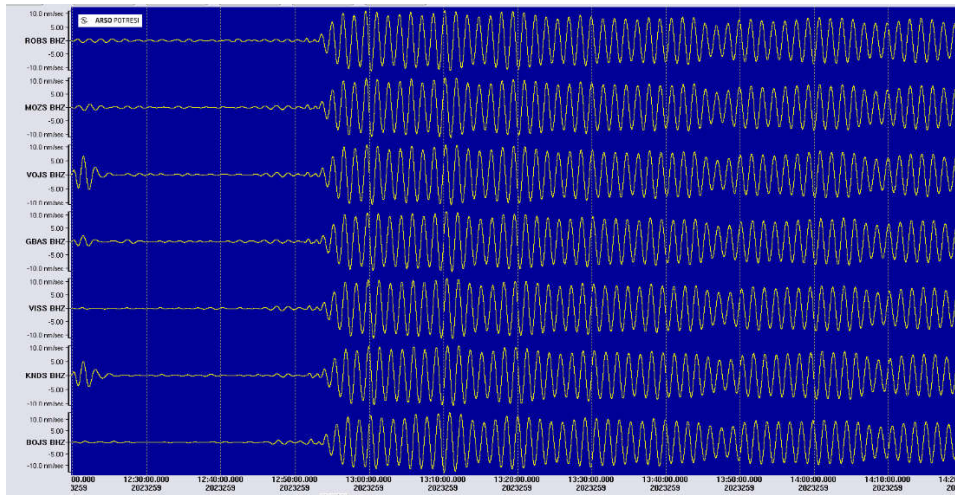
Slika 5. Normirani zapisi valovanja pri periodi 92 sekund, kot so ga zaznale nekatere potresne opazovalnice v Evropi. Sledi dveh, ene na Finskem (SFG) in ene na Grenlandiji (SFJD), sta označeni z rdečo, ker izstopata od ostalih, medtem ko imata med seboj zelo podobno valovno obliko. Njuna medsebojna oddaljenost je približno 3120 kilometrov.



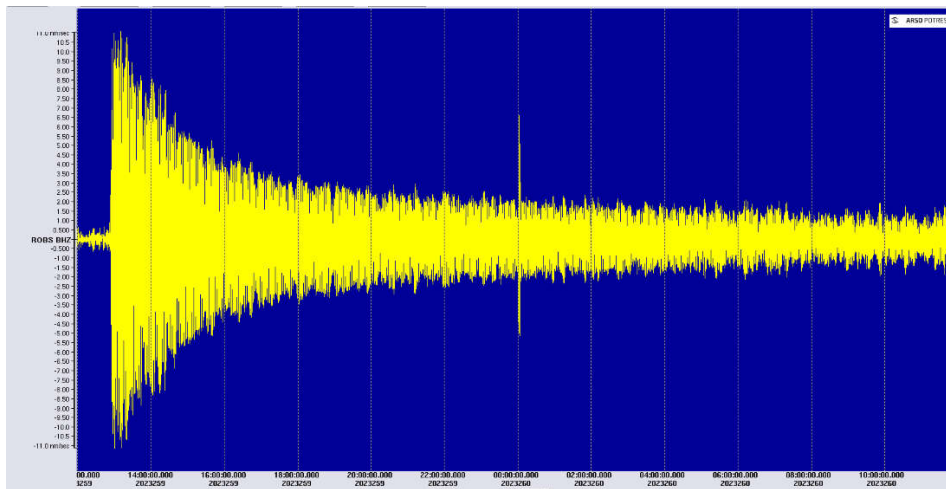
Slika 6. Če povežemo opazovalnici SFJD in SFG po najkrajši poti po površini Zemlje, potem dobimo na potencialnem območju seizmičnega izvora usmerjenost žariščnega mehanizma. S črno barvo je označena dejanska usmerjenost, kot je bila ugotovljena kasneje, le da je bil izvor seizmičnega signala 180 kilometrov bolj severno (glej tudi sliko 10) kot je trenutno označen na sliki.

Ker je vlovanje prihajalo iz SZ smeri je bila dogodku najbližja slovenska opazovalnica ROBS na Robiču, najdlje pa BOJS pri Bojancih. Potresi z območja v bližini Grenlandije oz. Islandije na slovenskih opazovalnicah praviloma niso dobro zabeleženi oz. morajo biti dovolj močni (magnituda vsaj okoli 5,0), da lahko dobro določimo vstopne čase posameznega valovanja. Pri pregledu seizmogramov 16. septembra, smo na nefiltriranem zapisu ob 12.50 UTC zaznali spremembo nihanja tal, ki pa je bila zelo neizrazita in bi jo zagotovo spregledali, če ne bi imeli v mislih prej omenjenih analiz zapisov. Z ustreznim filtriranjem smo nato dobili lep zapis vstopov površinskega valovanja (slika 7), katerega dušenje je bilo zelo počasno (slika 8).

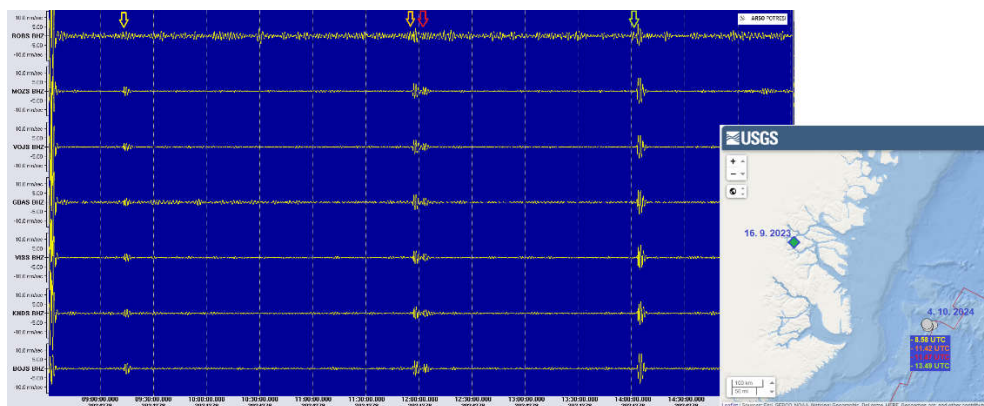
Da zapis ne pripada 'klasičnemu' potresu, dodajamo za primerjavo še zapis niza potresov, ki so se zgodili 24. oktobra 2024 pod Grenlandskim morjem. Vidni so štirje najmočnejši, z magnitudo med 4,8 in 5,2. Za prikaz je uporabljen enak filter in povečava zapisov, kot pri dogodku 16. septembra 2023. Vidimo lahko, da površinsko valovanje, kmalu po prihodu do opazovalnice tudi izveni (slika 9). Podatke (magnituda in lokacija) potresov smo poiskali v katalogu svetovnih potresov (NEIC, 2024).



Slika 7. Zapis navpične komponente seizmograma na sedmih slovenskih opazovalnicah, zloženih od zgoraj navzdol od najbližje do najbolj oddaljene. Signal je filtriran s pasovnim filtrom 10–12 mHz (83–100 s).



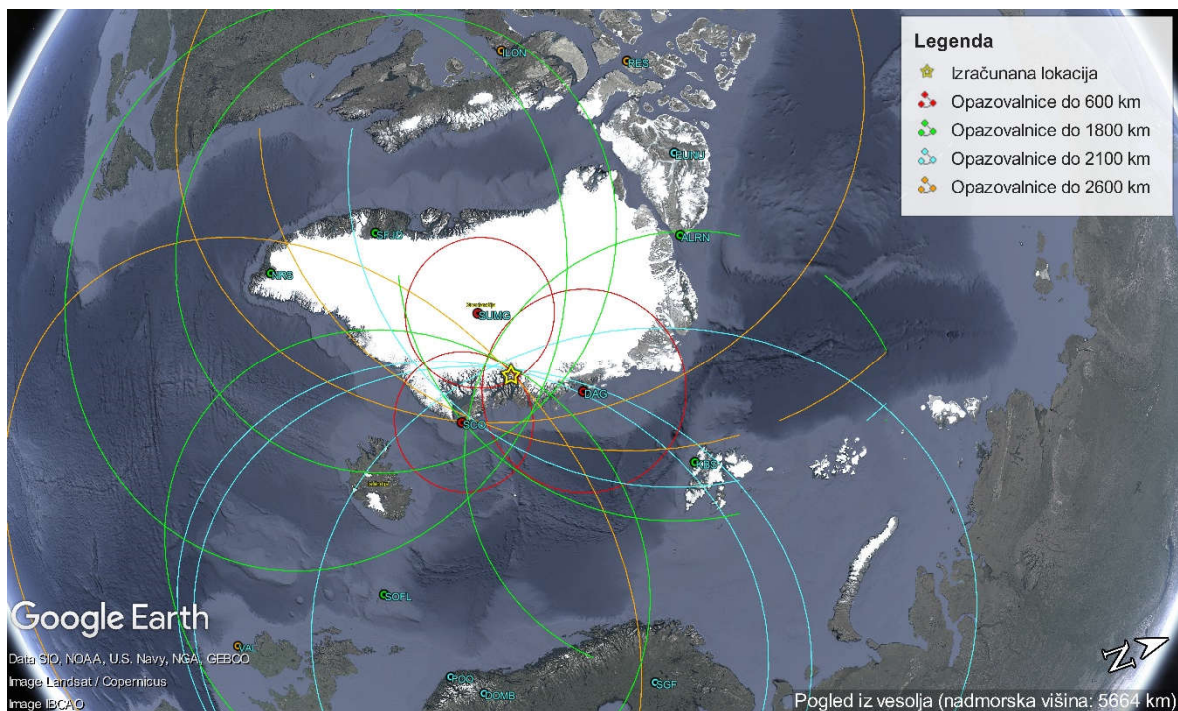
Slika 8. 24-urni zapis navpične komponente seizmograma na opazovalnici ROBS. Signal je filtriran s pasovnim filtrom 10–12 mHz (83–100 s).



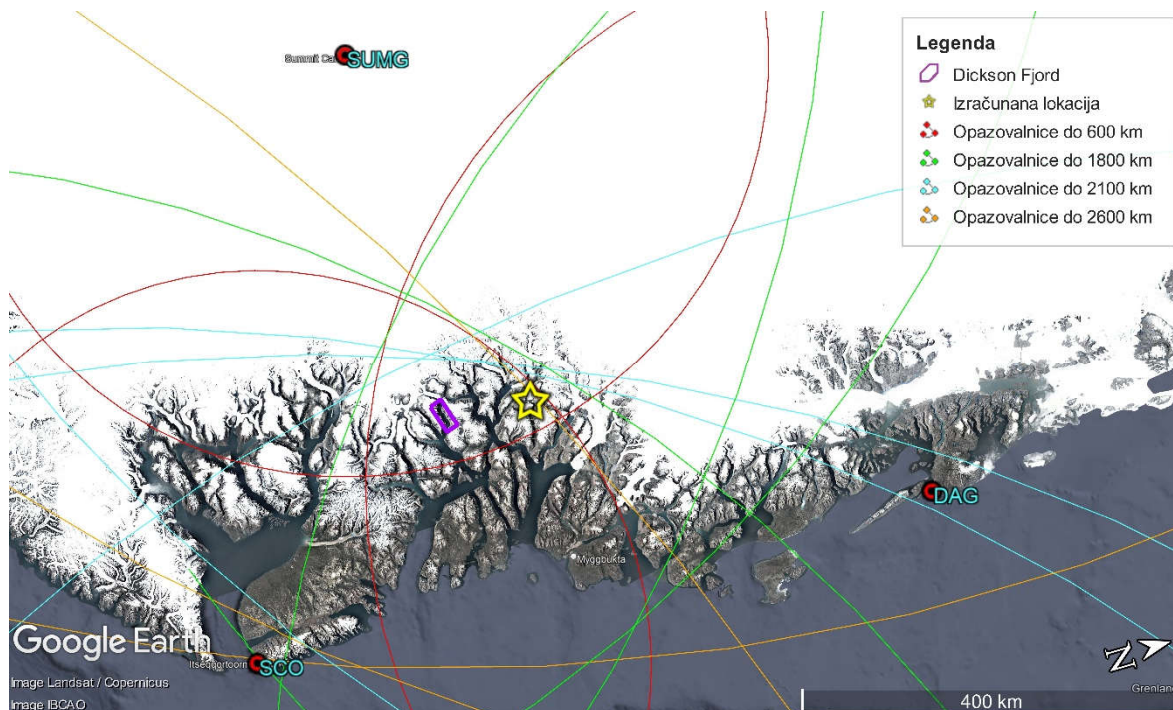
Slika 9. Zapis niza potresov 24. 10. 2024 z žariščem pod Grenlandski morjem na nekaterih slovenskih opazovalnicah. Signal je filtriran s pasovnim filtrom 10–12 mHz (83–100 s).

Iskanje lokacije nastanka signala

Želeli smo natančneje določiti lokacijo izvora nenavadnega signala, zato smo iz svetovnih seizmoloških arhivov prenesli seizmograme za izbrane opazovalnice na Grenlandiji ter v Evropi, Kanadi in Aljaski, do razdalje približno 6000 km. Najprej smo poskušali na seizmogramih odčitati začetek 92-sekundnega signala, vendar analiza teh faz ni dala smiselnih rezultatov, saj vstop valovanja ni sunkovit, napaka v odčitku že za eno samo periodo pa je ogromna – 92 sekund. Na seizmogramih smo z drugačnim filtrom tik pred 92-sekundnim signalom opazili paket nekaj valov z manjšo periodo, okoli 30 sekund, ki je imel jasnejši vstop in za katerega smo kasneje ugotovili, da je verjetno izviral od plazu (slika 12), ki je povzročil cunami. Oblika tega paketa je podobna na zapisih več opazovalnic, zato smo lahko odčitali isto fazo. Iz časovne razlike med prihodom te faze do parov opazovalnic, ki so približno na isti liniji s predvidenim izvorom, smo ocenili hitrost valovanja na 3,8 km/s. V naslednjem koraku smo s preprostim algoritmom na koordinatni mreži poiskali točko, ki ima najmanjšo vsoto potence potovalnih časov iz treh najbližjih opazovalnic: SCO, SUMG in DAG. Za vsako od treh opazovalnic smo določili čas nastanka faze, iz njihovega povprečja pa določili še razdalje, ki jih je prepotovalo valovanje z dano hitrostjo do vseh ostalih opazovalnic. Rezultate smo za lažjo predstavbo prikazali v programu Google Earth Pro (Google, 2024). Izračunana lokacija je označena z rumeno zvezdico, prepotovane razdalje pa so prikazane s krogi različnih barv, glede na oddaljenost opazovalnic, za večjo preglednost (slika 10). Podrobnejši pogled na presečišče ocenjenih prepotovanih razdalj (slika 11) pokaže, da smo z dokaj preprosto metodo zadeli področje izvora signala na približno 100 km natančno.



Slika 10. Lokacija izvora signala (rumena zvezda) je izračunana s preprostim algoritmom iskanja v koordinatni mreži. Krogi okrog opazovalnic prikazujejo razdaljo, ki jo je valovanje prepotovalo iz izvora do vsake opazovalnice in so različnih barv glede na oddaljenost opazovalnic. Hitrost valovanja je ocenjena iz povprečja časovnih razlik vstopov na pare opazovalnic, ki so približno v isti linije glede na veznico z izvorom.



Slika 11. Bližji pogled na področje izvora signala pokaže, da smo dokaj dobro ocenili lokacijo izvora signala, saj se prava lokacija cunamija v fjordu Dickenson (vijolični pravokotnik, povzeto po članku iz revije Science) nahaja prav na sredini presečišča ocenjenih časov potovanja valovanja do treh najbližjih opazovalnic.

200-metrski cunami na Grenlandiji

Skoraj leto kasneje od dogodka (13. 9. 2024) je v reviji Science izšel članek (Svennevig et al., 2024), kjer je skupina več deset znanstvenikov, vključno s seizmologi, geofiziki in oceanografi, objavila svoje rezultate leto dni trajajoče analize seizmičnih in ostalih podatkov za dogodek 16. 9. 2023, ki je povzročil izvor večdnevnega 92-sekundnega nihanja tal po celem svetu. Temu članku so sledili še nekateri drugi članki, ki so dodatno opisali opazovanja pojava (Carrillo-Ponce et al., 2023).

Na vzhodni obali Grenlandije v fjordu Dickson (slika 12) je sesedanje manjšega ledenika destabiliziralo strmo gorsko pobočje. Masiven plaz, ki je vključeval približno 25 milijonov kubičnih metrov kamnin in ledu, se je zrušil v fjord. Plaz je zadel vodno površino skoraj pod kotom 90 stopinj in ustvaril 200-meterski cunami. Zaradi zaprtosti fjorda in njegovih visokih navpičnih pobočij so valovi večinoma ostali v njem ujeti, kar je povzročilo dolgotrajno oscilacijo, ki je v fjordu trajala kar devet dni. Zabeležena je bila na seizmometrih po vsem svetu. Pojav se imenuje tudi séš (francosko "seiche") in je vrsta stoječega valovanja v zaprtem ali delno zaprtem površinskem vodnem telesu, podobno kot voda pljuska gor in dol v kopalni kadi (Wikipedia, 2024).

Del cunamija se je vseeno tudi razširil izven meja fjorda. Otok Ella, ki je od mesta plazu oddaljen cca. 55 kilometrov, je zadel val višine 4 metrov in uničil tudi arheološko najdišče na otoku. Ta otok je sicer priljubljena destinacija turističnih križark, na njegovih plažah se potniki pogosto ustavijo, a na srečo jih tega dne tam ni bilo.

Kljub temu, da tako veliki cunamiji niso zelo pogosti, je nekaj takih dogodkov že bilo zabeleženih v preteklosti. Nam najbližji se je zgodil v Italiji, 9. oktobra 1963, v dolini

Vajont. Zvečer tega dne je z gore Toc v takrat najvišje akumulacijsko jezero s takrat najvišjim jezom na svetu zdrsnil plaz, ki je vseboval 260 milijonov kubičnih metrov zemlje, dreves in skal. Plaz je povzročil uničujoč 200-metrski val, ki je šel delno v nasprotni smeri jezov in dosegel vasi Erto in Casso. Drug del pa je 'preskočil' jez in odhrumel v dolino. Udarni val, ki je opustošil večkilometrsko območje, je terjal okoli 2000 življenj.

21. novembra 2000 sta skalni podor in zemeljski plaz povzročila cunami na južni obali Nuussuaqa v srednjem delu zahodne Grenlandije. Višina vala naj bi bila ponekod med 100 do 250 metrov, a ni zahteval nobenih žrtev, le uničil je nekaj manjših čolnov.



Slika 12. Izvor 200-meterskega cunamija in s tem 92-sekundnega seizmičnega pulziranja je bil plaz, ki se je sprožil na mestu, ki je na sliki označen z zvezdico (povzeto po članku iz revije Science). Zaradi strmih bregov fjorda so valovi nato oscilirali skoraj 9 dni med obema bregovoma, ki sta približno 4 km vsaksebi.

Zaključek

Pri rednem nadzoru delovanja potresnih opazovalnic Državne mreže smo opazili nenavaden signal, ki se je začel 16. septembra 2023 popoldne, viden na vseh širokopasovnih opazovalnicah in je trajal vsaj šest dni. Signal smo opazili na spektrogramih v zelo ozkem frekvenčnem pasu okrog periode 92 sekund. Analiza signala je pokazala, da je njegov izvor nekje na obalnem območju JV Grenlandije. Signal so zabeležile vse širokopasovne potresne opazovalnice na svetu. Pri analizi dogodka smo uporabili podatke izbranih opazovalnic okrog Grenlandije, do razdalje 6000 km.

Literatura

Carrillo-Ponce, A., Heimann, S., Petersen, G.M., Walter, T.R., Cesca, S., and Dahm, T., 2024. The 16 September 2023 Greenland Megatsunami: Analysis and Modeling of the Source and a Week-Long, Monochromatic Seismic Signal, *The Seismic Record*, 4, 3, 172-183, DOI: 10.1785/0320240013

- NEIC, 2024. Search Earthquake Catalogue. US Department of the Interior. Geological Survey, National Earthquake Information Center. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (19. 8. 2024)
- Peterson, J., 1993. Observations and modeling of seismic background noise, U.S. Geol. Surv., Open File Rep., 93–322. <https://doi.org/10.3133/ofr93322>
- Svennevig, K., Hicks, S.P., Forbriger, T., Lecocq, T., Widmer-Schmidrig, R., Mangeney, A., Hibert, C., Korsgaard, N.J., Lucas, A., Satriano, C., Anthony, R.E., Mordret, A., Schippkus, S., Rysgaard, S., Boone, W., Gibbons, S.J., Cook, K.L., Glimsdal, S., Løvholt, F., Van Noten, K., Assink, J.D., Marboeuf, A., Lomax, A., Vanneste, K., Taira, T., Spagnolo, M., De Plaen, R., Koelemeijer, P., Ebeling, C., Cannata, A., Harcourt, W.D., Cornwell, D.G., Caudron, C., Poli, P., Bernard, P., Larose, E., Stutzmann, E., Voss, P.H., Lund, B., Cannavo, F., Castro-Díaz, M.J., Chaves, E., Dahl-Jensen, T., Pinho Dias, N.D., Déprez, A., Develter, R., Dreger, D., Evers, L.G., Fernández-Nieto, E.D., Ferreira, A.M.G., Funning, G., Gabriel, A.-A., Hendrickx, M., Kafka, A.L., Keiding, M., Kerby, J., Khan, S.A., Dideriksen, A.K., Lamb, O.D., Larsen, T.B., Lipovsky, B., Magdalena, I., Malet, J.-P., Myrup, M., Rivera, L., Ruiz-Castillo, E., Wetter, S., and Wirtz, B., 2024. A rockslide-generated tsunami in a Greenland fjord rang Earth for 9 days, *Science*, 385, 1196-1205, DOI: 10.1126/science.adm9247
- Tasič I., 2014. Zaznavanje zunajtropskih ciklonov Iz severnega atlantskega oceana s seizmografi Državne mreže potresnih opazovalnic. *Ujma*, 28, 213–218
- Tasič I., 2015. Spodnja raven seizmičnega šuma v Sloveniji. *Ujma*, 29, 343–349
- Tasič I., 2016. Kontrola delovanja seizmometra. *Ujma*, 30, 343–349
- Tasič I., 2018. Seizmometer in pospeškometer – Merilni par na potresni opazovalnici. *Ujma*, 32, 210–217
- Tasič I., 2022. Nenehno seizmično pulziranje s periodo 26 sekund in njegov izvor. *Ujma*, 36, 275–279
- Wikipedia , 2024. Seš. <https://sl.wikipedia.org/wiki/Se%C5%A1> (26. 11. 2024)
- Google, 2024. Google Earth Pro 7.3.5.9796