

S SLOVENSKO MREŽO POTRESNIH OPAZOVALNIC SMO ZABELEŽILI 200-METRSKI CUNAMI NA GRENLANDIJI

Izidor Tasič¹, Jurij Pahor², Tamara Jesenko³

Povzetek

Cunamiji so naravne nesreče, ki lahko za seboj pustijo pravo opustošenje. Takemu dogodku smo bili priča leta 2004 v Indijskem oceanu. Vzroki zanje niso vedno le močni potresi. Tudi pri plazovih, padcih meteoritov, izbruhih vulkanov in drugih pojavih, pri katerih se v zelo kratkem času premaknejo velike količine materiala v vodnem telesu, se lahko pojavi ogromen val, ki se širi na vse strani. 16. septembra 2023 okoli 13. ure UTC so opazovalnice državne mreže potresnih opazovalnic zabeležile zelo neznačilen seizmični signal s periodo 92 sekund, katerega amplituda je v naslednjih šestih dnevih počasi upadala. Ugotovili smo, da prihaja valovanje iz smeri sever-severozahod, še bolj presenetljivo spoznanje pa je bilo, da so ga zaznale skoraj vse širokopasovne potresne opazovalnice po svetu do razdalje več tisoč kilometrov. Podrobnejša analiza, ki smo jo opravili na pridobljenih podatkih, je pokazala, da to izrazito monokromatsko valovanje izvira z obmorskega območja jugovzhodne Grenlandije, več o izvoru pa takrat nismo mogli ugotoviti. Čez približno leto dni smo v reviji Science našli članek, ki je obravnaval prav ta dogodek. Velika multidisciplinarna mednarodna skupina raziskovalcev je ugotovila, da je 200-metrski cunami v fjordu Dickson na Grenlandiji, ki je bil posledica ogromnega plazu, v tem fjordu ustvaril večdnevno stoječe valovanje, imenovano tudi seš.

DETECTION OF 200-METRE TSUNAMI IN GREENLAND BY SLOVENIAN SEISMIC STATIONS

Abstract

Tsunamis are natural disasters which can create unimaginable havoc, as was the case in 2004 in the Indian Ocean. They are not necessarily triggered by strong earthquakes; their source can also be a landslide, meteor fall, volcanic eruption or other event which causes large amounts of material to be displaced in a body of water, causing a large water wave to travel outward. On September 16th 2023, at around 1 PM UTC, a very narrow, atypical seismic signal was recorded by the Seismic Network of the Republic of Slovenia, with a wave period of 92 s and a slowly decreasing amplitude which could be observed for more than six days. We estimated the waves were arriving from a N-NW direction and to our surprise were recorded by most broadband seismic stations over a very large area, up to several thousand kilometres from the suspected origin. A deeper analysis of the seismograms revealed that this very monochromatic wave had originated in a coastal area of SE Greenland, but not much more could be discovered at that point. After about a year an article was published in Science magazine, discussing an event in Dickson Fjord in SE Greenland which had been analysed by a large international multidisciplinary group of scientists, which was found to have been a tsunami and seiche in the fjord triggered by a large landslide.

¹ mag., Ministrstvo za okolje, podnebje in energijo, Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo, Vojkova cesta 1b, Ljubljana, izidor.tasic@gov.si

² Ministrstvo za okolje, podnebje in energijo, Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo, Vojkova cesta 1b, Ljubljana, jurij.pahor@gov.si

³ mag., Ministrstvo za okolje, podnebje in energijo, Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo, Vojkova 1b, Ljubljana, tamara.jesenko@gov.si

UVOD

Temeljna funkcija potresne opazovalnice je beleženje potresov. Potresne opazovalnice, ki so del državne mreže potresnih opazovalnic na slovenskem ozemlju, so opremljene s sodobnimi širokopasovnimi seizmometri, ki so sposobni beležiti zelo šibka nihanja tal. Če želimo zaznati šibke signale potresov, drugi seizmični signali, ki niso posledica potresa, ne smejo

prekriti potresnega valovanja. Te signale imenujemo seizmični šum, kar pa je nekoliko neupravičeno. Danes se zavedamo, da se veliko zanimivih informacij skriva prav v seizmičnem šumu, zato tudi vse več raziskav temelji na parcialni analizi »nepotresnih« signalov (Tasič, 2014; Tasič, 2022; Tasič, 2024). Z identifikacijo in poznavanjem časovne dinamike teh signalov poskušamo razumeti fizikalne pojave njihovih izvorov ter tako določiti njihove značilnosti.

Pri analizi seizmičnega šuma pogosto uporabljamo spektralni zapis seizmičnega signala, kar pomeni, da seizmograme s posebno tehniko prepisemo iz časovne v frekvenčno domeno. Iz takih spektrogramov lahko pridobimo informacije o frekvenčni zastopnosti energije v seizmičnem signalu.

NENAVADEN SEIZMIČNI POJAV

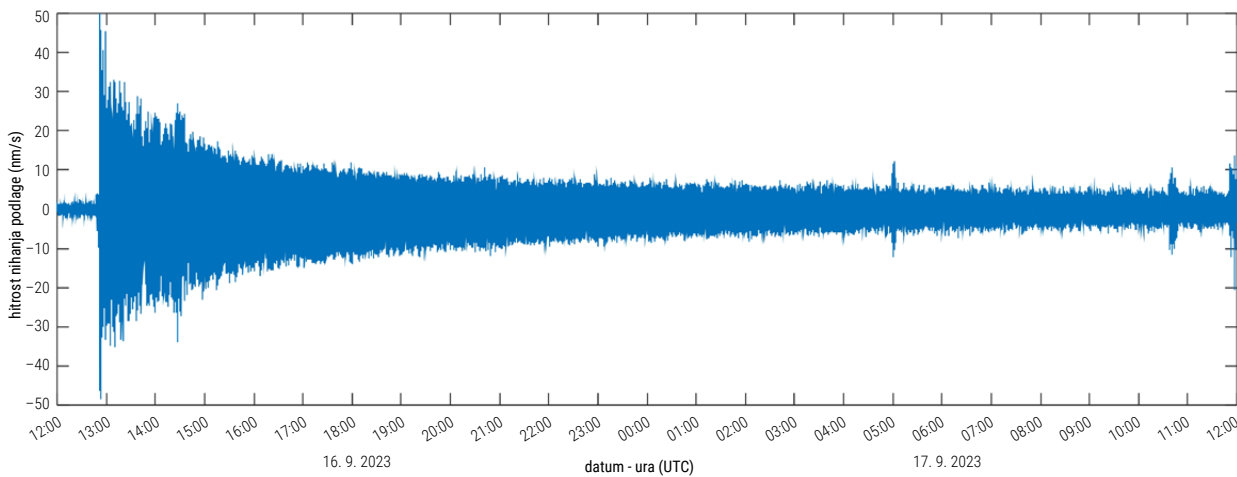
Pri rutinski analizi spektrogramov smo 16. septembra 2023 opazili zelo neznačilen signal s periodo okoli 92 sekund, ki se je začel v drugi polovici dneva (slika 1). Signal je bil tako nenavaden, da smo najprej pomislili na okvaro seizmološke opreme, vendar smo kmalu ugotovili, da so enakega zabeležile vse slovenske potresne opazovalnice s širokopasovnimi seizmometri. Naknadno smo ugotovili, da ga niso zaznale le slovenske opazovalnice, temveč tudi vse širokopasovne opazovalnice iz sosednjih držav, katerih podatke sproti zajemamo v okviru osrednje- in vzhodnoevropske seizmološke raziskovalne mreže (CE3RN, 2025). Videli smo, da je amplituda signala pri opazovalnicah, ki so južneje od Slovenije, manjša. Analiza pojava 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.

Signal pri periodi 92 sekund je potem v naslednjih dneh počasi upadal in ga v zapisih slovenskih potresnih opazovalnic po šestih dneh ni bilo več mogoče zaznati. Tako dolg monokromatski signal je zelo

nenavaden in neznačilen. S posebnim algoritmom smo preiskali seizmogramе slovenskih opazovalnic vse do leta 2010, če je bil še kdaj zabeležen podoben signal v bližini 92-sekundne periode, vendar tega nismo zasledili.

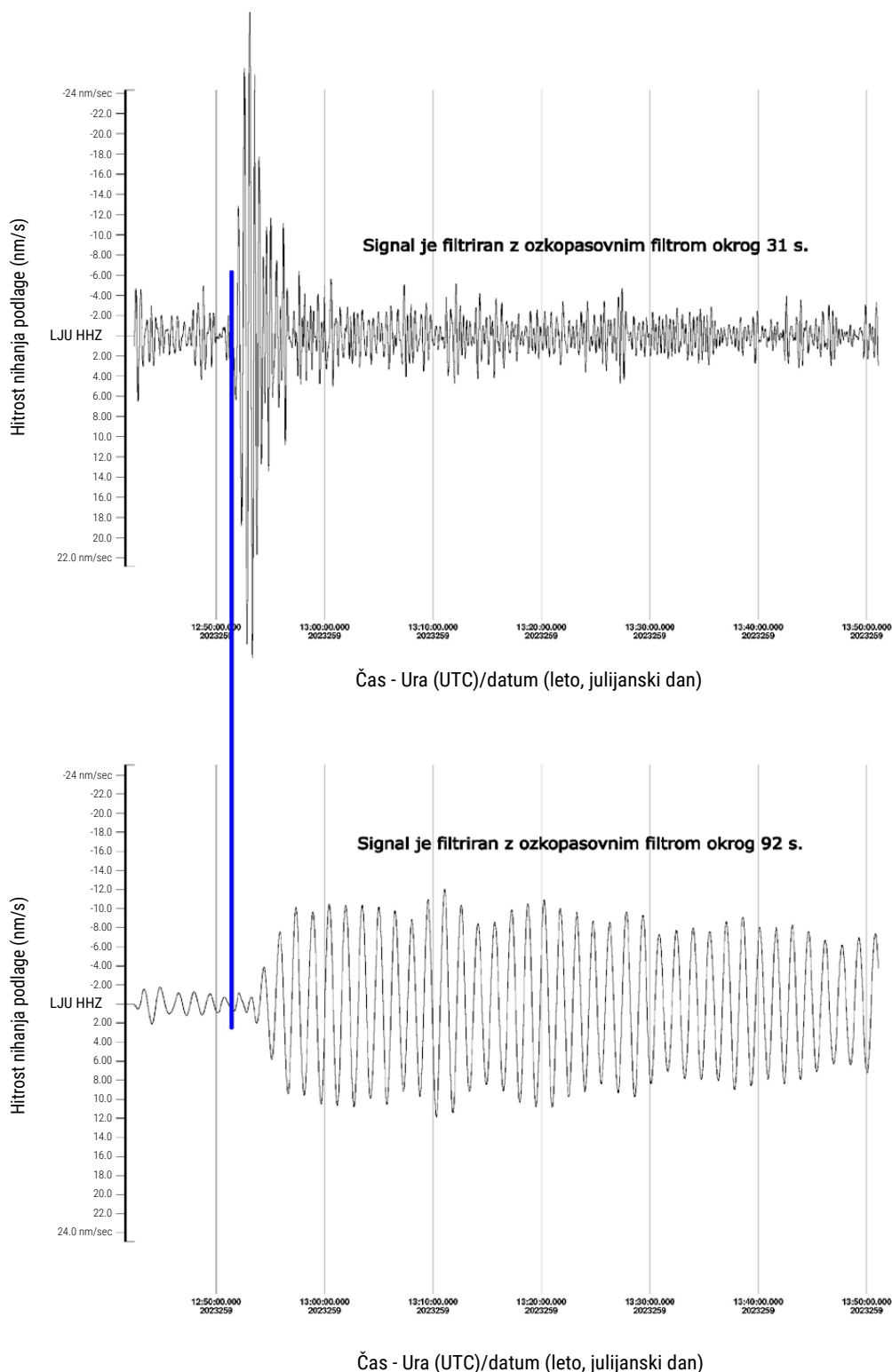
Podrobnejša analiza nenavadnega signala je pokazala, da se je začel s kratkim paketom nekaj valov s periodo približno 31 sekund, temu pa je sledil dolgotrajen signal s periodo 92 sekund (slika 2). Poleg podatkov slovenskih potresnih opazovalnic smo pridobili seizmogramе več tujih opazovalnic v Evropi, Kanadi in na Aljaski ter na zapisih odčitati čase prihodov začetnega paketa valov. Iz vstopnih časov v opazovalnicah, ki so bile približno v liniji s pričakovanim izvorom, smo ocenili hitrost potovanja valov. Iz ocenjene hitrosti in iz časov prihodov valovanja do teh opazovalnic smo določili približen položaj dogodka na jugovzhodnem delu obale Grenlandije (slika 3). Pri analizi seizmičnih zapisov več tujih potresnih opazovalnic smo naleteli na dve, ki sta med seboj oddaljeni okoli 3120 kilometrov – ena je na Finskem in druga na zahodni obali Grenlandije. Zapisa seizmičnega signala pri periodi 92 sekund sta se pri teh dveh opazovalnicah opazno razlikovala od drugih (slika 4). Ocenili smo, da ima sevalna funkcija izvora najmanjšo energijo sevanja v smeri obeh potresnih opazovalnic.

Kaj bi lahko bil izvor teh nenavadnih zapisov na seizmogramih, smo lahko le ugibali. Poleg tega tudi nismo pričakovali, da bi bila naša ocenjena lokacija zelo natančna.



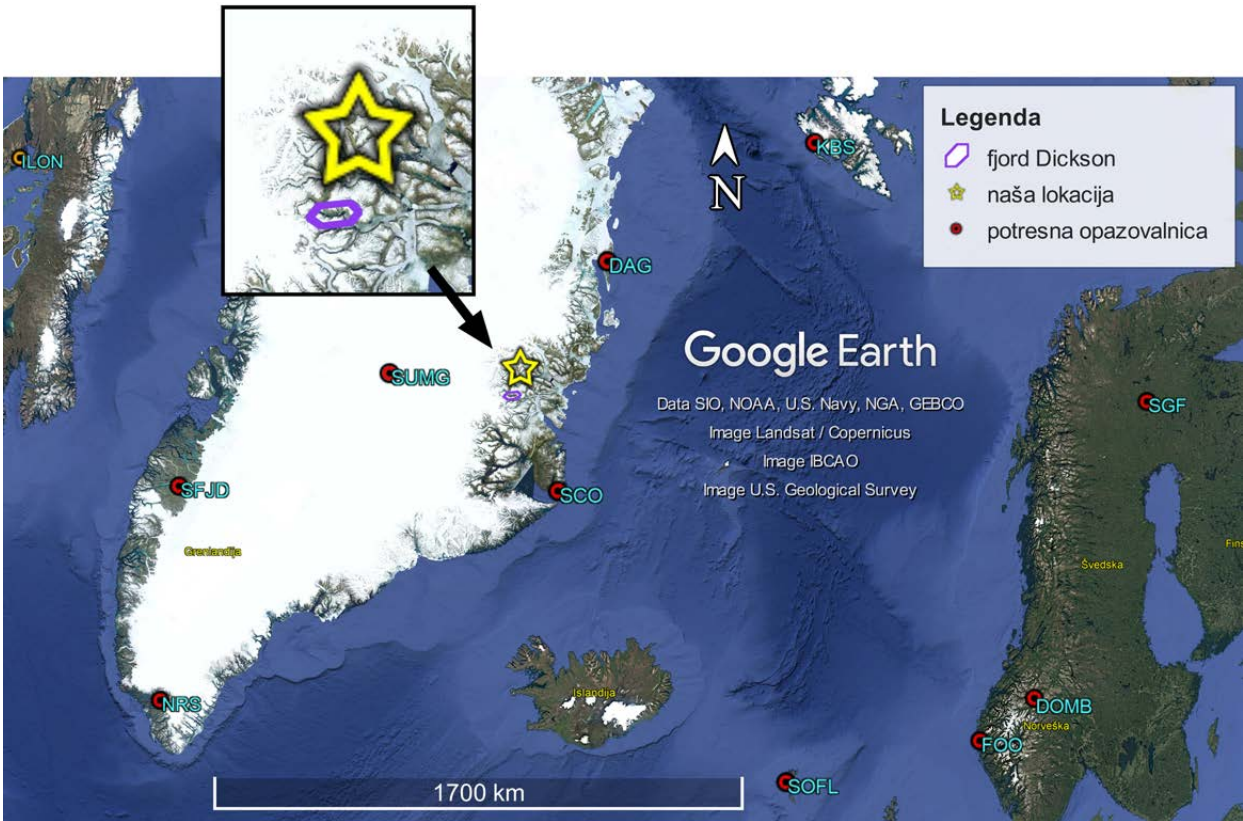
Slika 1: Štiriindvajseturni združen zapis seizmogramov od 16. do 17. septembra 2023 prikazuje počasno upadanje amplitude signala z Grenlandije. Zapis je nastal z združitvijo podatkov iz vseh slovenskih potresnih opazovalnic z dolgoperiodnimi seizmometri, s čimer smo zmanjšali vpliv zapisov oddaljenih potresov na identifikacijo dogodka.

Figure 1: A 24-hour combined seismogram shows the slowly decaying amplitude of the signal originating in Greenland. The seismogram is a combination of the records of all the long-period seismic stations in Slovenia, aiming to reduce the influence of undesired recordings of other sources, such as distant earthquakes, on the analysis.



Slika 2: Signal, ki smo ga 16. septembra 2023 zasledili na zapisih iz slovenskih potresnih opazovalnic, filtriran z ozkopasovnimi filtri: začetek dogodka je prepoznaven pri periodi okoli 31 sekund, ki hitro zamre (zgoraj). Pozneje smo ta signal prepoznali kot seizmični odtis 200-metrskega cunamija. Temu signalu takoj sledi signal z 92-sekundno periodo (spodaj), ki zamre šele po šestih dneh. Ta signal izvira iz stoječega valovanja vode v fjordu. Prikazan je zapis vertikalne komponente seizmometra na opazovalnici LJU v Ljubljani, začetek seizmičnega signala na potresni opazovalnici LJU je označen z navpično modro črto.

Figure 2: The signal observed on 16 September 2023 in the records of Slovenian seismic stations, filtered using narrow-band filters: the beginning of the event has a monochromatic frequency of 31 seconds and quickly decays (above). We later identified this signal to be the seismic footprint of the 200-metre tsunami. It was followed by a monochromatic 92 second oscillation slowly decaying for the next 6 days (below). This is the record of the standing wave in the fjord body of water. The picture shows the record from the vertical seismometer component at the station LJU in Ljubljana; the start of the seismic signal at the LJU seismic station is marked by a vertical blue line.



Slika 3: Naša lokacija (rumena zvezda) je 85 km oddaljena od fjorda Dickson (vijoličasta obroba, povečana v kvadratu zgoraj), ki ga je mednarodna študija določila kot izvor valovanja. Na sliki so tudi lokacije potresnih opazovalnic (rdeči krogi skupaj z oznako opazovalnice) (ISC, 2025; IRIS, 2025), katerih podatke smo uporabili za določitev naše lokacije.

Figure 3: The estimated location (yellow star) is 85 km away from Dickson Fjord (purple border – enlarged in the square above), which an international study has identified as the source of the wave. The image also shows the locations of seismic observatories (red circles with observatory labels) (ISC, 2025; IRIS, 2025), whose data we used to determine our location.

200-METRSKI CUNAMI NA GRENLANDIJI

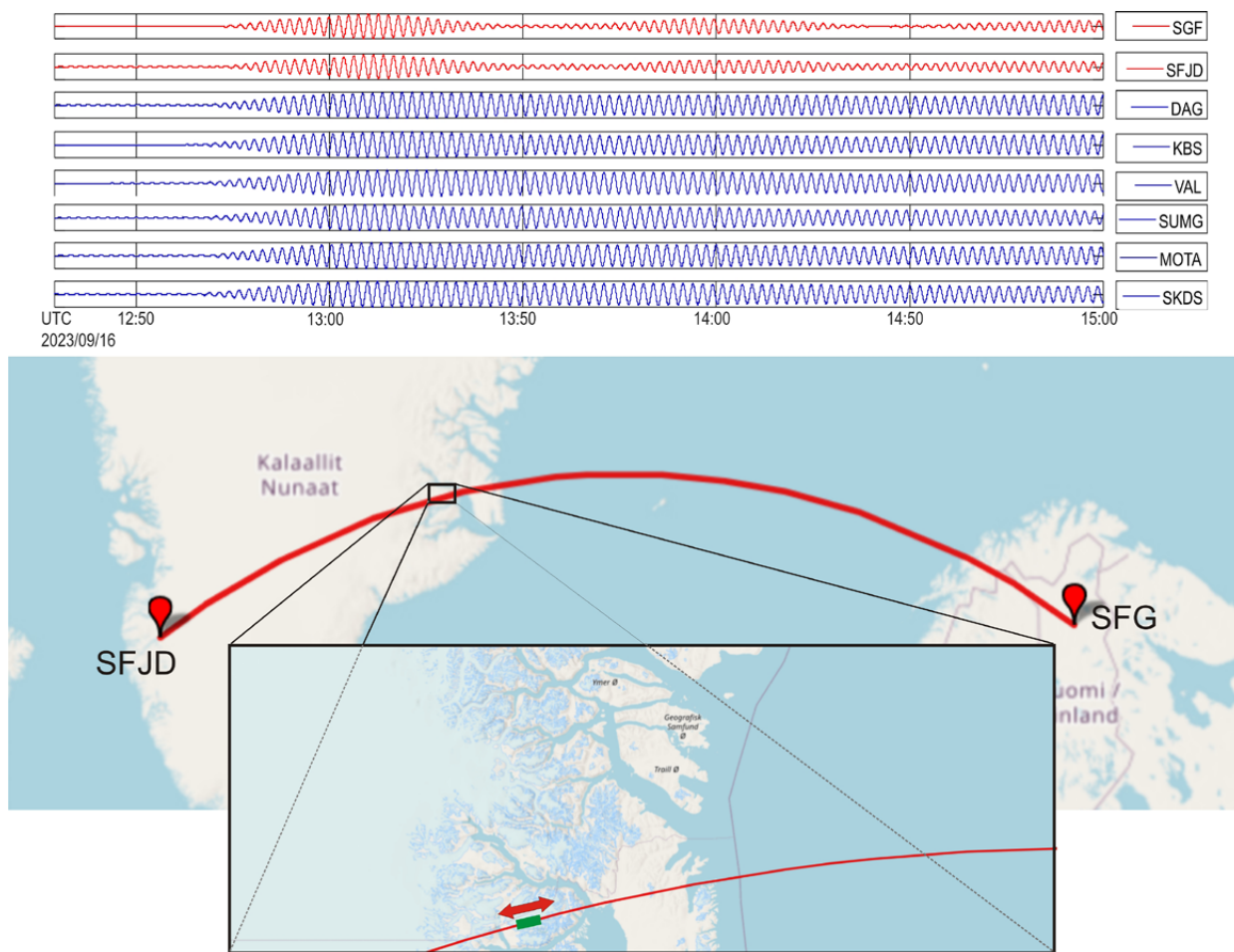
Skoraj leto pozneje je v reviji Science izšel članek (Svennevig in sod., 2024), v katerem je skupina več deset znanstvenikov, vključno s seizmologi, geofiziki in oceanografi, objavila rezultate leto dni trajajoče analize dogodka 16. septembra 2023, ki je bil izvor večdnevnega 92-sekundnega nihanja tal po vsem svetu. Temu članku so sledili še drugi, ki so dodatno opisali opazovanja pojava (Carrillo-Ponce in sod., 2023).

Na vzhodni obali Grenlandije je sesedanje manjšega ledenika v fjordu Dickson destabiliziralo strmo gorsko pobočje. Masiven plaz, približno 25 milijonov kubičnih metrov kamnin in ledu, se je zrušil v fjord (slika 5). Plaz je zadel vodno površino skoraj pod kotom 90 stopinj in ustvaril 200-metrski cunami. Zaradi zaprtosti fjorda in njegovih visokih navpičnih pobočij so valovi večinoma ostali v njem ujeti, kar je povzročilo dolgotrajno oscilacijo v prečni smeri, ki je v fjordu trajala kar devet dni. Zabeležena je bila na seizmografih po vsem svetu. Pojav se imenuje tudi seš (francosko

seiche) in je vrsta stoječega valovanja v zaprtem ali delno zaprtem vodnem telesu, podobno kot voda pljuska gor in dol v kopalni kadi (Wikipedia, 2025 a).

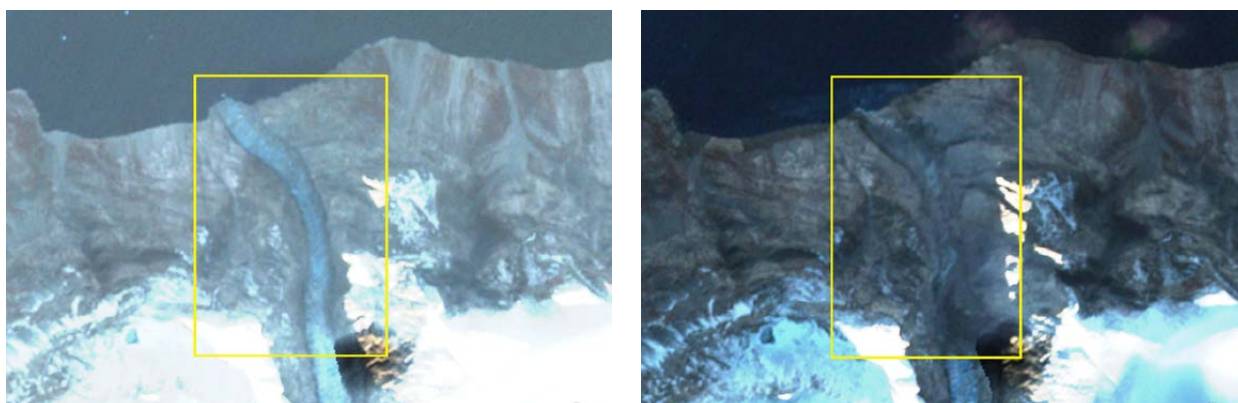
Del cunamija se je vseeno razširil tudi izven fjorda. Med drugim je val višine 4 metre zadel otok Ella, ki je od mesta plazu oddaljen približno 55 kilometrov, in uničil arheološko najdišče. Ta otok je tudi priljubljena destinacija turističnih križark, na njegovih plažah se potniki pogosto izkrcajo, vendar jih na srečo tega dne tam ni bilo.

Čeprav tako veliki cunamiji niso zelo pogosti, je nekaj takih dogodkov že bilo v preteklosti. Nam najbližji se je zgodil v Italiji, 9. oktobra 1963, v dolini Vajont (Wikipedia, 2025 b; Hardenberg, 2011). Zvečer tega dne je z gore Toc v takrat najvišje akumulacijsko jezero s takrat najvišjim jezom na svetu zdrsnil plaz, 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, drugi del pa je pljusnil čez jez in odhrumel v dolino. Udarni val, ki je opustošil večkilometrsko območje, je zahteval približno 2000 življenj.



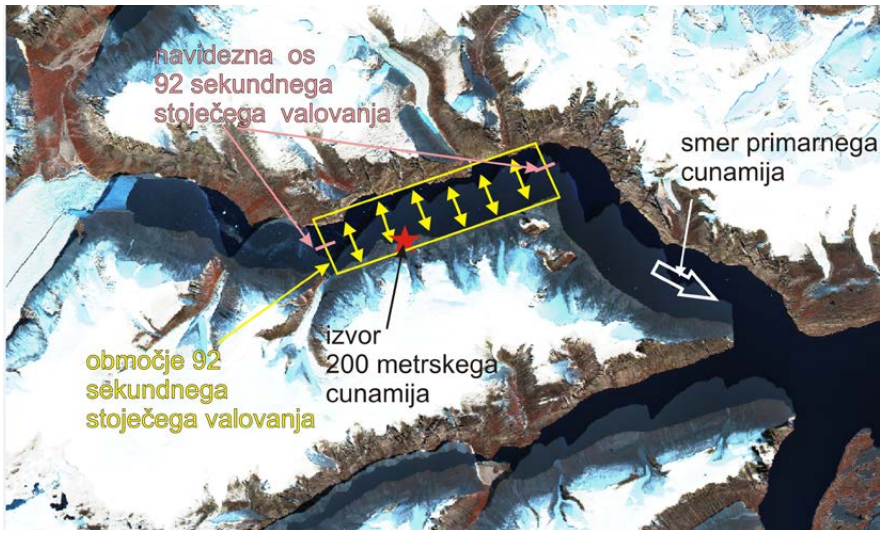
Slika 4: Seizmična zapisa z dveh opazovalnic, ena je na Finskem (SGF), druga na zahodni obali Grenlandije (SFJD), med seboj oddaljenih okoli 3120 km, sta se opazno razlikovala od vseh drugih (zgoraj). To je nakazalo na obliko sevalne funkcije, ki ima najmanjšo energijo sevanja v smeri obeh potresnih opazovalnic (spodaj). Z zeleno odebeljeni del označuje območje, ki smo ga z drugimi metodami določili kot izvor signala. Zapisi na sliki zgoraj so premaknjeni v času na enak začetek glede na slovensko opazovalnico LJU.

Figure : Seismic records from two stations around 3120 km apart, one in Finland and the other on the west coast of Greenland, showed a different temporal behaviour of the amplitude (above). This indicated a type of radiation source mechanism, with the lowest energy emitted in the direction of the two seismic stations (below). The green line marks the area which we determined as the signal source by other methods. The records in the picture above are shifted in time to the same time origin as recorded at the Slovenian station LJU.



Slika 5: Satelitski posnetek fjorda pred plazom (slika levo, nastala 14. septembra 2023) in po njem (slika desno, nastala 17. septembra 2023). Na sliki je območje plazu občrtano z rumenim kvadratom, v katerem se lepo vidi sprememba na ledeniku. Pozoren opazovalec lahko opazi tudi spremembo hribine v spodnjem desnem delu kvadrata (Copernicus Browser, 2025).

Figure 5: Satellite footage of the fjord before (taken on 14 September 2023, left) and after the landslide (taken on 17 September 2023, right). The area of the landslide in the yellow square shows a distinct change between two dates. The change to the mountainside in the lower right corner is also visible (Copernicus Browser, 2025).



Slika 6: Dvestometrski cunami (rdeča zvezda) je povzročil stoječe valovanje prečno čez fjord (rumene puščice) s periodo 92 sekund. Zaradi strmih bregov fjorda so valovi med obema bregovima, ki sta približno 4 km vsak sebi, oscilirali skoraj 9 dni.

Figure 6: The 200 m tsunami (red star) gave rise to a standing wave oscillating in a transversal direction to the fjord (yellow arrows) with a period of 92 seconds. Due to the fjord's steep sides, approximately 4 km apart, the standing waves oscillated almost 9 days.

21. novembra 2000 sta skalni podor in zemeljski plaz povzročila cunami na južni obali Nuussuaqa v srednjem delu zahodne Grenlandije (Pedersen in sod., 2002). Višina vala naj bi bila od 100 do 250 metrov, vendar ni zahteval smrtnih žrtev, le uničil je nekaj manjših čolnov.

SKLEPNE MISLI

Temeljna naloga potresnih opazovalnic je beleženje potresov. Druge signale naravnega in umetnega izvora, ki zmanjšujejo sposobnost zaznavanja šibkih potresov, imenujemo seizmični šum. V zadnjem času se vse več raziskav osredotoča prav na analizo seizmičnega šuma, saj ta vsebuje informacije o geološki sestavi Zemlje in naravnih pojavih.

Slovenske potresne opazovalnice, opremljene s širokopasovnimi seizmometri, so 16. septembra 2023

zaznale nenavaden dolgoperiodni signal s periodo 92 sekund, ki je trajal več dni. Sprva smo domnevali, da gre za tehnično napako, vendar se je izkazalo, da so signal zaznale potresne opazovalnice v več državah Evrope in severne Amerike. Analiza je pokazala, da je signal prihajal iz smeri sever-severozahod s hitrostjo 4,1 km/s.

Z dodatno analizo podatkov iz tujih opazovalnic smo približno locirali vir signala na jugovzhodno obalo Grenlandije, a natečen izvor nam je ostal neznan. Skoraj leto pozneje je znanstveni članek v reviji Science razkril, da je bil prožilec signala masiven plaz, ki je sprožil 200-metrski cunami v fjordu Dickson. Valovi so ostali ujeti v fjordu in povzročili dolgotrajno stoječe valovanje, ki ga imenujemo seš in je trajalo devet dni. Dogajanje so zaznale potresne opazovalnice do razdalje več tisoč kilometrov od izvora.

Viri in literatura

1. Carrillo-Ponce, A., Heimann, S., Petersen, G. M., Walter, T. R., Cesca, S., 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.
2. CE3RN, 2025. Central and Eastern European Earthquake Research Network – CE3RN. <http://www.ce3rn.eu/>, 21. 8. 2025.
3. Copernicus Browser, 2025. <https://dataspace.copernicus.eu/browser/>, 15. 5. 2025.
4. Hardenberg, W. G. v., 2011. Expecting Disaster: The 1963 Landslide of the Vajont Dam. Arcadia (2011), no. 8. <https://doi.org/10.5282/rcc/3401>.
5. IRIS, 2025. MetaData Aggregator. <https://ds.iris.edu/mda/>, 21. 8. 2025.
6. ISC, 2025. International Registry of Seismograph Stations. <https://www.isc.ac.uk/registries/search/>, 21. 8. 2025.
7. Pedersen, S., Larsen, L., Dahl-Jensen, T., Jepsen, H., Pedersen, G., Nielsen, T., Pedersen, A., Platen-Hallermund, F., Weng, W., (2002). Tsunami-generating rock fall and landslide on the south coast of Nuussuaq, central West Greenland. Geology of Greenland Survey Bulletin. 191. 73–83. 10.34194/ggub.v191.5131.
8. Svennevig, K., Hicks, S. P., Forbriger, T., Lecocq, T., Widmer-Schmidrig, R., Mangeney, A., Hibert, C., in sod., 2024. A rockslide-generated tsunami in a Greenland fjord rang Earth for 9 days, Science, 385, 1196–1205, DOI: 10.1126/science.adm9247.
9. Tasič, I., 2014. Zaznavanje zunajtropskih ciklonov iz severnega atlantskega oceana s seizmografiji Državne mreže potresnih opazovalnic. Ujma, 28, 213–218, <https://ojs-gr.zrc-sazu.si/ujma/article/view/8637>.
10. Tasič, I., 2022. Nenehno seizmično pulziranje s periodo 26 sekund in njegov izvor. Ujma, 36, 275–279, <https://ojs-gr.zrc-sazu.si/ujma/article/download/8332/7772/22916>.
11. Tasič, I., 2024. Seizmično zaznavanje izrednih vremenskih dogodkov leta 2023 na državni mreži potresnih opazovalnic. Ujma, 38, 301–312, <https://ojs-gr.zrc-sazu.si/ujma/article/view/9394>.
12. Wikipedia, 2025 a. Seš. <https://sl.wikipedia.org/wiki/Seš>, 21. 8. 2025.
13. Wikipedia, 2025 b. Vajont Dam. https://en.wikipedia.org/wiki/Vajont_Dam, 21. 8. 2025.