

OBČUTLJIVOST POTRESNE OPAZOVALNICE NA VELIKI ŠTANGI

SENSITIVITY OF THE SEISMIC STATION AT VELIKA ŠTANGA

Tatjana Prosen¹, Jure Bajc¹, Mladen Živčić¹

Izvleček. Predstavljena je analiza potresov v okolici Velike Štange pri Litiji, kjer je Uprava RS za geofiziko (URSG) avgusta 1999 postavila začasno potresno opazovalnico, ki je v desetih mesecih delovanja zabeležila nekaj sto potresov. Naš cilj je bila določitev razlike med občutljivostjo opazovalnice v dnevnem in v nočnem času. Občutljivost je odvisna od seizmičnega nemira, ki je v veliki meri posledica človeške dejavnosti in je zato podnevi običajno večji kot ponoči. Problema smo se lotili na zanimiv, a nekoliko nestandarden način – uporabili smo model naključne hoje, ki ima fizikalno ozadje v Brownovem gibanju. Najpomembnejši rezultat raziskave je, da lahko z veliko statistično gotovostjo trdimo, da so bili potresi, ki so imeli na opazovalnici na Veliki Štangi amplitudo odmikov nad 32 nm, zabeleženi enakomerno prek celega dneva, medtem ko so bili šibkejši potresi pogostejše zabeleženi ponoči kot podnevi. Za opazovalnico na Veliki Štangi smo poiskali tudi semiempirično formulo za lokalno magnitudo bližnjih potresov, ki nam da ustrezno magnitudno mejo 0,3.

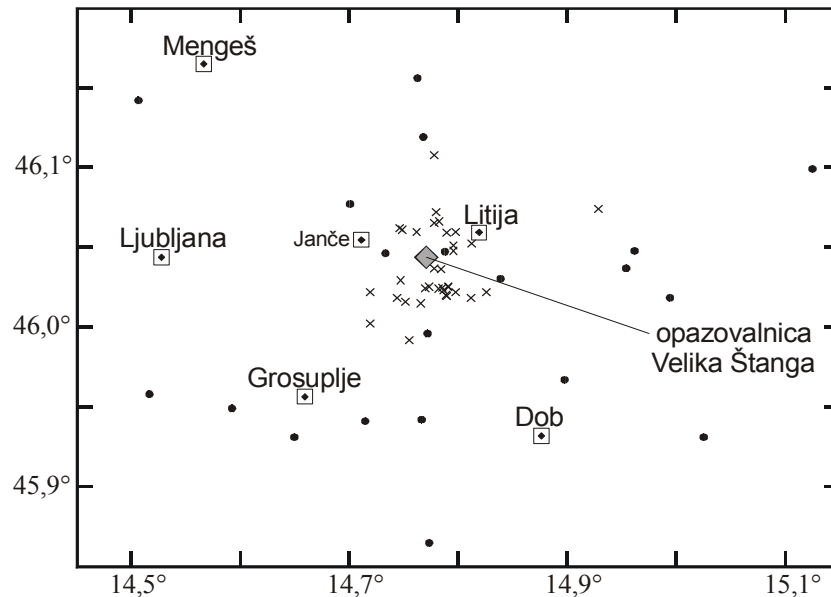
Abstract. We study the seismic activity around the Velika Štanga near Litija, where we (the Geological Survey) have set up a temporary station in August 1999. It recorded several hundreds of earthquakes in 10 months of operation. The aim of the study is to determine the difference in the sensitivity of the station during daytime and night time. As the sensitivity depends on the seismic noise, which is often manmade, it is reasonable to expect it to be smaller during the night. We used an interesting, though a bit non-standard approach, based on so called “random walk”, mathematical generalization of the Brownian motion. Our most important statistically confident result is that the earthquakes, recorded by the temporary station Velika Štanga with the displacement amplitude exceeding 32 nm, were recorded evenly throughout the entire day, whereas weaker events were recorded more frequently over night time. In addition, we derived a semiempirical local magnitude formula for the nearby events recorded by the station Velika Štanga. The local magnitude limit, corresponding to displacement 32 nm, is 0.3.

Uvod

V bližini Litije je mreža slovenskih potresnih opazovalnic od avgusta 1998 zaznala precej potresov z lokalnimi magnitudami do 4 (najmočnejši, 31.8.1998, $M_{LV} = 4,2$, pri Dobu na Dolenjskem (slika 1) je bil nekoliko bolj oddaljen, Cecić s sod., 1999). Potresna aktivnost v tem delu Slovenije ni novost, vendar pa je število potresov po potresu konec avgusta 1998 precej večje, kot je bilo pred tem. Zato se je URSG odločila v bližini postaviti instrument, da bi te potrese bolje zaznali in da bi zabeležili tudi šibkejše med njimi. Seizmometer smo postavili v klet kmečkega turizma na Veliki Štangi ($46^{\circ} 2,62' N$, $14^{\circ} 46,23' E$, z : 460 m).

Analizirali smo potresno aktivnost od avgusta 1999 do maja 2000. V tem času je opazovalnica zaznala prek tristo potresov, od tega smo več desetim lahko določili koordinate žarišča (slika 1). Tako smo zbrali zadostno količino podatkov za statistično obdelavo, s katero smo želeli preveriti domnevo, da ponoči zaznamo več potresov kot podnevi. Domneva je razumljiva, saj je seizmični nemir ponoči bistveno manjši kot podnevi in je razmerje signala proti šumu podnevi manjše kot ponoči. Za preverjanje domneve se nam je zdel najbolj primeren model naključne hoje (random walk), ki smo ga preslikali na naš problem.

¹ Agencija RS za okolje, urad za seizmologijo, Dunajska 47, Ljubljana



Slika 1. Epicentri bližnjih (×) in bolj oddaljenih (•) potresov v okolici opazovalnice na Veliki Štangi. Med bližnje potrese smo šteli le take, ki imajo žarišče od opazovalnice oddaljeno manj kot 8 km (glej tekst).

Figure 1. The epicenters of near (×) and more distant (•) earthquakes around the station Velika Štanga, “near” meaning the hypocentral distances smaller than 8 km (see text for details).

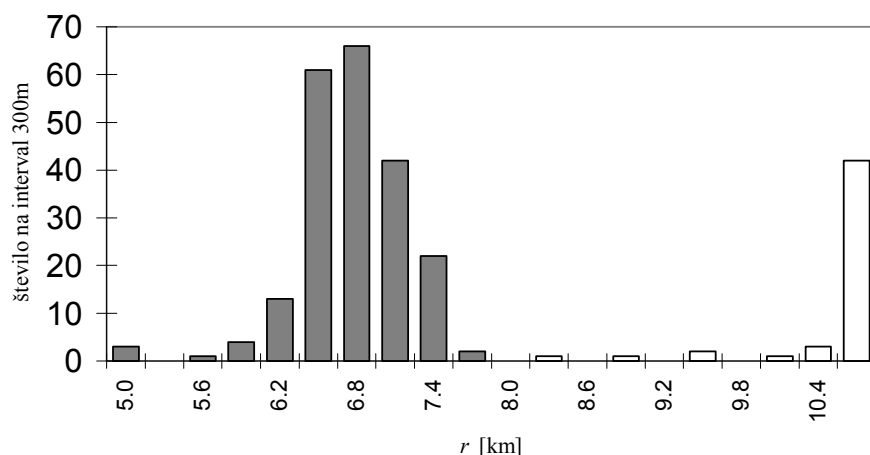
Podatki

V seizmologiji je definiranih več magnitud, katerih namen je podati oceno moči potresa. Magnituda naj bi v logaritemski skali odražala med potresom sproščeno elastično energijo. Na URSG uporabljamo za lokalne in regionalne potrese oddaljene do 800 km *lokalno* magnitudo (M_{LV}). Maksimalno fazo za izračun lokalne magnitude (M_{LV}) poiščemo na *vertikalni* komponenti zapisa tresenja tal v skupini transverzalnih (S) ali površinskih valov

$$M_{LV} = \log \left(\frac{A}{T} \right)_{MAX} + 1,52 \log \left(\frac{d}{111} \right) - 2,9 ,$$

kjer je A amplituda odmikov v nanometrih, T nihajni čas v sekundah ter d nadžariščna oddaljenost v kilometrih.

Zabeležene potrese na opazovalnici na Veliki Štangi lahko v grobem ločimo v dve skupini: na tiste, ki so bili zabeleženi le na tej opazovalnici ter na tiste, katere so zabeležile tudi nekatere opazovalnice stalne državne mreže potresnih opazovalnic (7 opazovalnic). V raziskavi smo uporabili le osnovne količine, ki jih določimo iz seizmograma: čas prihoda faze P (longitudinalni valovi) in faze S ter maksimalno fazo M. V grobem velja, da je oddaljenost r sorazmerna s časovno razliko prihodov S in P valov: $r = c(t_s - t_p)$, kjer sta t_s in t_p časa prihodov S in P valov, parameter c pa lahko predstavimo kot nekakšno navidezno hitrost, ki se izraža s hitrostmi P in S valov v posameznih plasteh Zemljine skorje. Potresom iz druge skupine smo zato lahko določili osnovne parametre: koordinate žarišča, žariščni čas in lokalno magnitudo M_{LV} dobljeno iz več opazovalnic. Takih potresov je bilo premalo za dovolj zanesljivo statistično analizo, zato smo uporabili vse potrese, a upoštevali le podatke opazovalnice na Veliki Štangi.



Slika 2. Porazdelitev potresov zabeleženih na Veliki Štangi glede na oddaljenost r od opazovalnice. Opazovalnica je poleg bližnjih zabeležila tudi nekaj bolj oddaljenih potresov (beli stolpci), ki ne sodijo v gručo, ki jo raziskujemo. Z izbiro potresov, ki so od opazovalnice oddaljeni do 8,0 km (temni stolpci), se omejimo le na potrese iz gruče.

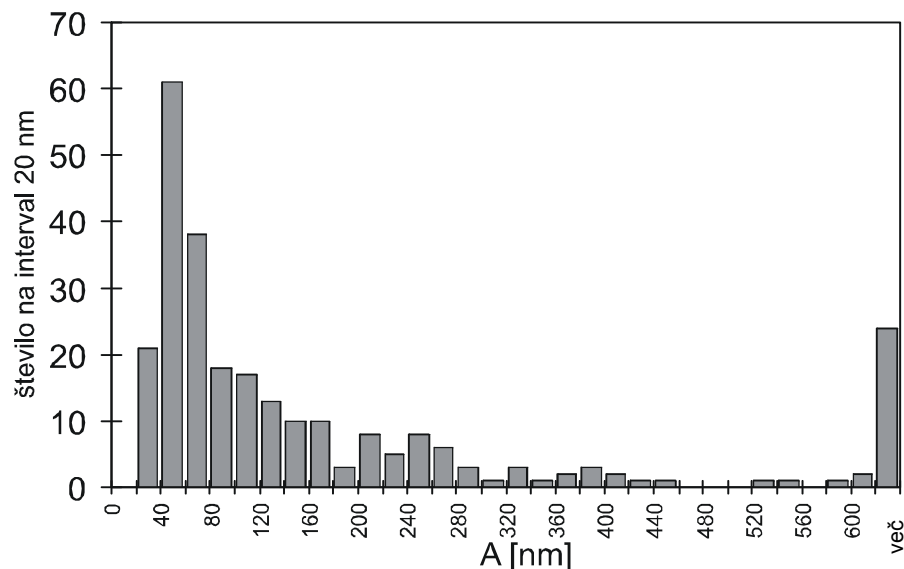
Figure 2. Distribution of earthquakes, recorded by Velika Štanga, with respect to the distance r from the station. Besides the near by events the station recorded several distant earthquakes (white bars), which does not belong to the investigated group. By selecting only the events, not further than 8 km away from the station (dark bars), we restrict the study to the chosen group.

Na podlagi tomografske raziskave Slovenije (Michellini s sod., 1998) smo uporabili ustrežnejši enodimenzionalni hitrostni model in za navidezno hitrost c dobili vrednost 7,5 km/s. Iz podatkov odčitanih le na opazovalnici na Veliki Štangi smo ocenili oddaljenost r žarišča od opazovalnice. Izkazalo se je, da je porazdelitev potresov po oddaljenosti izrazito neenakomerna (slika 2), saj je večina potresov od opazovalnice oddaljena za 6,0 do 8,0 km. Po drugi strani je porazdelitev po amplitudah pričakovana; dogodkov z majhno amplitudo je več kot tistih z veliko (slika 3), vendar je število zabeleženih potresov z amplitudo pod 40 nm majhno, ker vseh ne zaznamo. Primerjava seizmogramov pokaže, da si je večina bližnjih potresov med seboj zelo podobnih. V nadaljnji obravnavi smo upoštevali le potrese, ki so od opazovalnice oddaljeni manj kot 8,0 km (polni stolpci na sliki 2). To je 214 potresov, od tega smo 36-im lahko določili lokacijo žarišča, 30-im pa še lokalno magnitudo M_{LV} iz opazovalnic stalne državne mreže. Pri izračunu semiempirične amplitudne formule smo uporabili 47 potresov, poleg gornjih 30 bližnjih potresov še 17 magnitud bolj oddaljenih potresov (do 30 km), za katere smo imeli podatek o magnitudi M_{LV} stalne državne mreže.

Občutljivost

Občutljivost opazovalnice razumemo kot opredelitev spodnje meje amplitude nihanja tal, ko je potres na opazovalnici še zabeležen. Poleg kvalitete seizmografa na občutljivost vpliva tudi nivo seizmičnega nemira. Ker je znaten del tega nemira posledica človeške dejavnosti, je nemir ponoči običajno precej manjši kot podnevi. Kako seizmični nemir vpliva na občutljivost, je odvisno tudi od načina delovanja opazovalnice. Ta lahko bodisi neprekinjeno shranjuje podatke o tresenju tal, ali pa deluje prožno in shrani določen časovni segment le, če so izpolnjeni izbrani kriteriji. V prvem primeru je (ne)identifikacija potresa odvisna od nivoja nemira in metode analiziranja seizmogramov, v drugem pa je veliko odvisno že od nastavitve proženja, saj neproženih dogodkov ne moremo naknadno preiskati, ker jih nimamo

shranjenih. Prag za proženje je lahko nastavljen na izbrano vrednost merjene količine (pospešek, hitrost ali odmik) ali pa na vrednost razmerja STA/LTA med kratkotrajnim in dolgotrajnim povprečjem amplitud signala (Short Time Average = STA, Long Time Average = LTA). Izbira praga je kompromis med željo, da bi bilo zabeleženih čim več potresov (nizek prag), in omejenim pomnilnikom instrumenta. Opazovalnica na Veliki Štangi je beležila hitrosti nihanja tal in je bila prožena po metodi razmerja STA/LTA. Uporabljeni širokopasovni senzor Guralp GMT-40T naj bi dobro deloval v frekvenčnem območju od nekaj deset Hz do nihajnih časov okoli 10 sekund, zajemalni sistem RefTek pa ne omogoča spremenljivega filtriranja pred uporabo prožilnega algoritma STA/LTA (prag proženje je bil $STA/LTA > 5$, STA čas 0,25 sekunde in LTA čas 120 sekund).



Slika 3. Porazdelitev potresov zabeleženih na Veliki Štangi glede na amplitudo odmikov. Močnejših potresov je relativno malo. Opazimo, da je zabeleženih potresov za amplitude pod 40 nm manj, ker jih je del prekrit s šumom.

Figure 3. Distribution of earthquakes, recorded by Veliki Štanga, with respect to the displacement amplitude. The number of strong events is small. Note that the number of the events with the recorded amplitudes below 40 nm is small due to seismic noise.

Za analizo občutljivosti, predvsem za določitev razlik v občutljivosti opazovalnice podnevi in ponoči je izbrani izbor potresov zelo primeren. Kljub temu, da za določitev magnitude na tako majhnih razdaljah ne poznamo semiempirične formule, vemo, da bo ta vsebovala odvisnost od amplitude maksimalne faze premika v neki izbrani skupini valov, od nihajnega časa te faze in od oddaljenosti opazovalnice od žarišča potresa. Po drugi strani vemo, da naj bi bila magnituda logaritemsko odvisna od energije, torej $M \propto \log(A_0)$, kjer je A_0 amplituda nihanja na dovolj majhni oddaljenosti od potresa. Ker so potresi iz gručice na Veliki Štangi približno enako oddaljeni od opazovalnice (6 do 7 km) in so nihajni časi maksimalnih faz med seboj le malo različni (0,08 s do 0,13 s), vzamemo kot merilo za jakost potresa kar amplitudo A maksimalne faze oziroma za magnitudo njen logaritem, $\log A$.

Model naključne hoje

Naključno hojo iz osebnih izkušenj pozna vsak, ki se je že kdaj pošteno napil in poskušal kot tak peš priti do domačih vrat. Matematična definicija naključne hoje je še bolj splošna, saj sta tako dolžina kot smer koraka povsem naključni. Model podobnega naključnega gibanja je v

fiziki znan kot Brownovo gibanje. Primer za tako gibanje je delec, ki se giblje s hitrostjo, katere smer in velikost se spreminjata ob naključnih trkih s sosednjimi delci. Seveda ne znamo napovedati, kje je delec po dovolj dolgem času t , vendar pa lahko gibanje obravnavamo statistično in izračunamo povprečno (oziroma pričakovano) dolžino poti ali pa pričakovano oddaljenost od izhodišča po času t . In kakšno zvezo ima to s potresi?

Osnovna predpostavka je, da so potresi naključni dogodki, ki se pojavljajo ob kateremkoli času dneva z enako verjetnostjo. Če jih, denimo, zabeležimo med drugo in peto uro popoldne več (seveda z zadostno statistično gotovostjo) kot ob drugih delih dneva, potem je to po vsej verjetnosti problem izbrane metode detekcije in ne dejanska nepravilnost v pojavljanju potresov. Zanimajo nas ravno take spremembe v sposobnosti detekcije (občutljivosti) ob različnih časih, zato moramo izbrati tak model, da bomo z njim lahko v statističnem smislu zaznali neenakomernost v porazdelitvi števila potresov prek dneva. Kot čas nastanka potresa razumemo del žariščnega časa brez datuma. Čase nastanka potresov zato preslikamo na premikanje po ravnini. Vsakemu potresu ustreza en korak. Model naključne hoje je parametriziran z dvema naključnima spremenljivkama, z dolžino koraka d in njegovo smerjo φ . Pri preslikavi je pomemben le čas nastanka potresov v okviru posameznega dneva, zato model poenostavimo in določimo, da je dolžina koraka d za vse potrese enaka ena, čas nastanka potresa pa bijektivno preslikamo na smer koraka:

$$\varphi = \frac{t}{t_0} 2\pi = \frac{t}{t_0} 360^\circ$$

kjer je $t_0 = 24$ ur, t pa čas nastanka potresa. Tako polnoči ustreza kot 0° oziroma 360° , šesti uri zjutraj kot 90° , poldnevu kot 180° in tako dalje.

Premik zapišemo v vektorski obliki $d = (\sin \varphi, \cos \varphi)$, kjer φ štejemo od osi y v smeri urinega kazalca. Verjetnost, da je kot φ v intervalu $[\varphi, \varphi + d\varphi]$, je $dW(\varphi) = w(\varphi) d\varphi$, kjer je $w(\varphi)$ kotni del verjetnostne gostote za posamezen premik. Porazdelitev verjetnostne gostote po kotu je enakomerna, zato velja $w(\varphi) = (2\pi)^{-1}$. Skupna verjetnostna gostota za oddaljenost R od izhodišča po N korakih, je konvolucija N verjetnostnih gostot za posamezni premik d_i , ki jo zapišemo kot konvolucijo

$$w(R) = w(d_1) * w(d_2) * \dots * w(d_{N-1}) * w(R - d_1 - d_2 - \dots - d_{N-1})$$

To konvolucijo izračunamo v dveh korakih. Verjetnostno gostoto za $R = (X, Y)$ zapišemo kot produkt verjetnostnih gostot obeh komponent $w(X)$ in $w(Y)$. Za sestavljanje premikov po komponentah uporabimo centralni limitni izrek (Kuščer in Kodre, 1994), ki pravi, da se po N -kratni konvoluciji enakih verjetnostnih gostot $w(x)$ verjetnostna porazdelitev z naraščajočim N vse bolj približuje Gaussovi:

$$w^{(N)}(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_X^{(N)}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{X - \langle X \rangle^{(N)}}{\sigma_X^{(N)}}\right)^2\right]; \quad \langle X \rangle^{(N)} = N\langle x \rangle \quad \text{in} \quad (\sigma_X^{(N)})^2 = N\sigma_x^2,$$

kjer je $\langle x \rangle$ označena pričakovana oziroma povprečna vrednost koordinate x in s σ_x standardna deviacija oziroma efektivni odmik. Verjetnostna gostota $w(\varphi)$ nas vodi do

$$\langle x \rangle = \langle \cos \varphi \rangle = \int_0^{2\pi} \cos \varphi w(\varphi) d\varphi = \int_0^{2\pi} \cos \varphi \frac{d\varphi}{2\pi} = 0 \quad \text{in} \quad \sigma_x^2 \equiv \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2 = \frac{1}{2}.$$

Podobno velja $\langle y \rangle = 0$, $\sigma_y^2 = 1/2$ ter $\langle X \rangle^{(N)} = \langle Y \rangle^{(N)} = 0$ in $(\sigma_X^{(N)})^2 = (\sigma_Y^{(N)})^2 = N/2$.

Verjetnost $dW(X,Y)$ izrazimo z verjetnostno gostoto $w(X,Y) = w(X)w(Y)$

$$dW^{(N)}(X,Y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sqrt{N/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{X^2}{N/2}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sqrt{N/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{Y^2}{N/2}\right) dX dY$$

in jo prepišemo v cilindrične koordinate R, φ

$$dW^{(N)}(R,\varphi) = \frac{1}{\pi N} \exp\left(-\frac{R^2}{N}\right) R dR d\varphi.$$

Ker nas zanima oddaljenost R od izhodišča, verjetnostno gostoto $w(R,\varphi)$ integriramo po kotu φ , da dobimo verjetnostno gostoto za oddaljenost po N korakih $w(R)$

$$w^{(N)}(R) = \int_0^{2\pi} w^{(N)}(R,\varphi) d\varphi = \frac{2R}{N} e^{-\frac{R^2}{N}}$$

iz te pa izračunamo pričakovano oddaljenost po N korakih

$$\langle R \rangle^{(N)} = \int_0^\infty R w^{(N)}(R) dR = \sqrt{\frac{\pi}{4}} \sqrt{N}.$$

Semiempirična lokalna magnituda

Za telesne valove na majhnih razdaljah lahko domnevamo, da se njihova amplituda zmanjšuje le zaradi razširjanja valovne fronte (geometrijski faktor) in zaradi dušenja. Dušenje je posledica neelastičnih lastnosti plasti, skozi katere potujejo potresni valovi in je za telesne valove (P, S) v približku frekvenčno neodvisno. Torej velja

$$A = A_0 \frac{1}{r} e^{-\frac{\pi t}{QT}} \quad (1)$$

kjer je t čas od nastanka do prihoda maksimalne faze, T nihajni čas maksimalne faze in Q faktor dobrote, ki je definiran tako, da je relativna sprememba energije v času enega nihaja enaka $\Delta E/E = 1/Q$. V našem primeru iščemo maksimalno fazo v skupini S valov in se Q nanaša nanje. Za P valove je Q običajno približno dvakrat večji (Udías, 1999).

Iz podatkov o lokalni magnitudi M_{LV} za 47 potresov (iz državne mreže potresnih opazovalnic) smo določili neznane koeficiente a_i v semiempirični formuli, ki smo jo, izhajajoč iz enačbe (1), sestavili kot

$$M_{VSTG} = a_1 \log A[\text{nm}] + a_2 \log r[\text{km}] + a_3 (t/T) + a_4 \quad (2)$$

Koeficiente a_i smo določili z metodo najmanjše vsote kvadratov razlik (*least square method*) med modelsko M_{VSTG} in izmerjeno M_{LV} magnitudo, za katero smo izbrali mediano lokalnih magnitud državne mreže. Rezultati regresije so zbrani v preglednici 1.

Semiempirična formula za lokalno magnitudo na opazovalnici na Veliki Štangi za bližnje potrese je torej

$$M_{\text{VSTG}} = 0,678 \log A[\text{nm}] + 0,758 \log r[\text{km}] + 0,009(t/T) - 1,53$$

kjer je A amplituda v nanometrih in r oddaljenost žarišča v kilometrih. Pričakovana natančnost (standardna deviacija) magnitude, izračunane po tej enačbi, je $\pm 0,19$. Iz statistike koeficientov (preglednica 1) je dobro razvidno, da je najbolje določena odvisnost magnitude od ($\log A$), medtem ko lahko odvisnost od ($\log r$) in od (t/T) precej manj natančno določimo. Slednje je posledica dejstva, da je v skupini potresov, ki smo jih uporabili za regresijo, razpon podatkov po amplitudi maksimalne faze precej večji kot po oddaljenosti ali po nihajnem času maksimalne faze.

Preglednica 1. Statistika regresije magnitud po enačbi (2). V prvi vrstici so zbrane vrednosti iskanih koeficientov, v drugi zanesljivost izračunanih vrednosti, v zadnji pa verjetnost (po Student-ovi statistiki), da je korelacija med količino (denimo, $\log A$, t/T , ...), ki se nanaša na posamezen koeficient, in podatki (v našem primeru mediana magnitud državne mreže) zgolj naključna.

Table 1. The statistics of the regression for local magnitude according to the equation (2). In the first line the values of the coefficients are given, in the second line the confidence interval (standard deviation), and in the last line the probability (regarding Student's t-distribution) that the correlation between the quantity related to a particular coefficient and the data (in our case the mediana of the magnitudes of the permanent stations) is coincidental.

	a_1	a_2	a_3	a_4
koeficient	0,678	0,758	0,00923	-1,533
standardna deviacija	0,059	0,302	0,00322	0,315
Student-ov test	$4,6 \cdot 10^{-15}$	$7,9 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-6}$

Zanimivo je primerjati koeficienta a_1 in a_2 pred obema logaritmomoma. Glede na enačbo (1) bi morala biti enaka, dejansko pa je a_2 za približno 10 % večji, kar bi lahko prevedli v potenco P pri geometrijskem faktorju r^{-P} , ki bi potemtakem bila 1,1 in ne 1,0. Vendar je nedoločnost obeh, zlasti še a_2 , prevelika, da bi lahko kvantitativno ocenili razliko. Zaključimo lahko le, da se energija valovanja z razdaljo manjša bolj, kot to napoveduje povečevanje površine valovne fronte. To je tudi posledica dušenja, saj a_2 in a_3 nista povsem neodvisna. Faktor dobrote, ki ga izračunamo iz $a_3 = \pi/Q$, ima vrednost $Q = 340$, kar je veliko glede na pričakovane vrednosti za skorjo (okoli 100 za S valove). Zaradi odvisnosti med a_2 in a_3 je prav mogoče, da je faktor dobrote v resnici manjši na račun spremembe a_2 pred geometrijskim faktorjem, ki bi moral biti ustrezno nižji, kar je skladno s teorijo (enačba 1).

Rezultati

Potresi se dogajajo ob naključnih med seboj enako verjetnih časih in zato ustrezajo modelu naključne hoje. Seveda pa to velja le, če potrese beležimo enakomerno prek celega dne v

smislu, da ob nobenem delu dneva sposobnost detekcije ni različna od kakega drugega dela dneva. In tu se v igro vpletejo razlike med dnevom in nočjo. Za dovolj močne potrese je dnevni nemir premajhen, da bi oviral njihovo detekcijo in zabeleženi potresi se obnašajo skladno z modelom. Za šibkejšje potrese pa velja, da bo več potresov zaznanih ponoči, kar pomeni, da bodo ustrezne smeri pogostejše zastopane in oddaljenost od izhodišča bo večja, kot bi jo pričakovali po modelu.

Preglednica 2. Primerjava preslikave pojavljanja potresov na gibanje v ravnini z modelom naključne hoje. V prvem stolpcu je najmanjša vrednost logaritma amplitude premika, za katero potres še obravnavamo v posamezni preslikavi. V drugem je število dogodkov z amplitudo A večjo od A_{MIN} . R je oddaljenost od izhodišča po N korakih za potrese, $\langle R \rangle$ pričakovana oddaljenost od izhodišča za naključno hojo in W verjetnost, da smo po N korakih naključne hoje dlje kot R od izhodišča. Ko spustimo mejo logaritma amplitude z 1,55 na 1,50, dodamo 158 potresom le 16 novih. Kljub majhnemu številu dodanih potresov se podobnost z naključno hojo za skoraj 10-krat zmanjša.

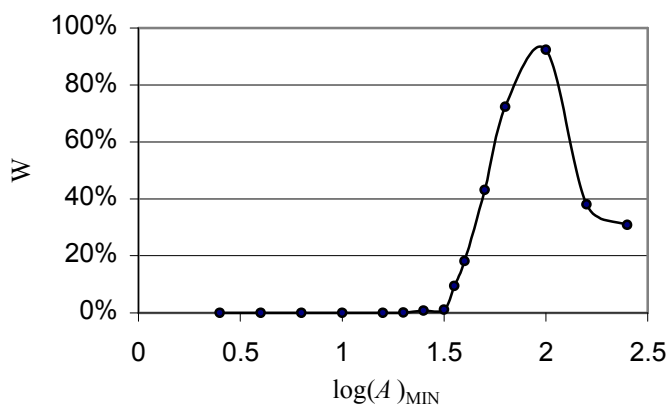
Table 2. Comparison of the mapping of the earthquake occurrence to the motion on the plane with the random walk model. In the first column the lowest logarithm of the displacement amplitude for which the event is retained in the mapping is shown. The second indicates the number of events with A greater than A_{MIN} . The distance from the origin after N steps is denoted by R , the expected distance from the origin by $\langle R \rangle$, and the probability that the distance from the origin is greater than R after N steps by W . When the logarithm of the smaller displacement amplitude is changed from 1.55 to 1.50, only 16 new events is added to the previous 158. Nevertheless, the similarity with the random walk model is reduced for almost a factor of 10.

$\log(A)_{\text{MIN}}$	N	R	$\langle R \rangle$	W
0.40	214	47.55	12.96	0.003%
0.60	213	46.98	12.93	0.003%
0.80	212	47.71	12.90	0.002%
1.00	211	46.79	12.87	0.003%
1.20	204	40.07	12.66	0.04%
1.30	197	35.95	12.44	0.14%
1.40	187	30.16	12.12	0.77%
1.50	174	28.09	11.69	1.07%
1.55	158	19.28	11.14	9.51%
1.60	149	15.96	10.82	18.1%
1.70	132	10.54	10.18	43.1%
1.80	118	6.19	9.63	72.3%
2.00	94	2.73	8.59	92.4%
2.20	66	7.99	7.20	38.0%
2.40	39	6.77	5.53	30.9%

Zdaj lahko preverimo hipotezo, da je opazovalnica na Veliki Štangi dovolj šibke potrese beležila pogostejše ponoči kot podnevi. Hipotezo preverjamo tako, da izračunamo, s kolikšno verjetnostjo bi izmerjena oddaljenost $R^{(N)}$ lahko bila rezultat naključne hoje, oziroma enakomerne porazdelitve pojavljanja potresov čez dan. Kot merilo za jakost potresa smo definirali količino $\log(A)$, skladnost časovne porazdelitve potresov z modelom naključne hoje pa izrazimo z verjetnostjo

$$W(R^{(N)} \geq k\langle R \rangle^{(N)}) = \int_{k\langle R \rangle^{(N)}}^{\infty} w(R) dR = e^{-\left(\frac{k^2 \pi}{4}\right)},$$

kjer oddaljenost od izhodišča $R^{(N)}$ izrazimo v enotah pričakovane oddaljenosti $\langle R \rangle^{(N)}$, $k = R^{(N)} / \langle R \rangle^{(N)}$. Odvisnost te verjetnosti od spodnje meje $\log(A)_{\text{MIN}}$ potresov, ki smo jih upoštevali pri preslikavi pojavljanja potresov na premikanje po ravnini, ima pri vrednosti $\log(A)_{\text{MIN}} = 1,5$ izrazito koleno (preglednica 2 in slika 4). Za potrese pod mejo 1,5 lahko z gotovostjo prek 98% trdimo, da so prek dneva beleženi neenakomerno. Preslikava časov nastanka potresov na gibanje po ravnini ima prevladujočo smer, ki ustreza sredini noči (slika 5 zgoraj in sredina), kot smo tudi pričakovali. Po drugi strani so potresi, za katere velja $\log(A) > 1,5$, enakomerno zabeleženi prek celega dneva, kar nam poleg statistike (preglednica 2) pokaže tudi ustrezno gibanje po ravnini (slika 5 spodaj).

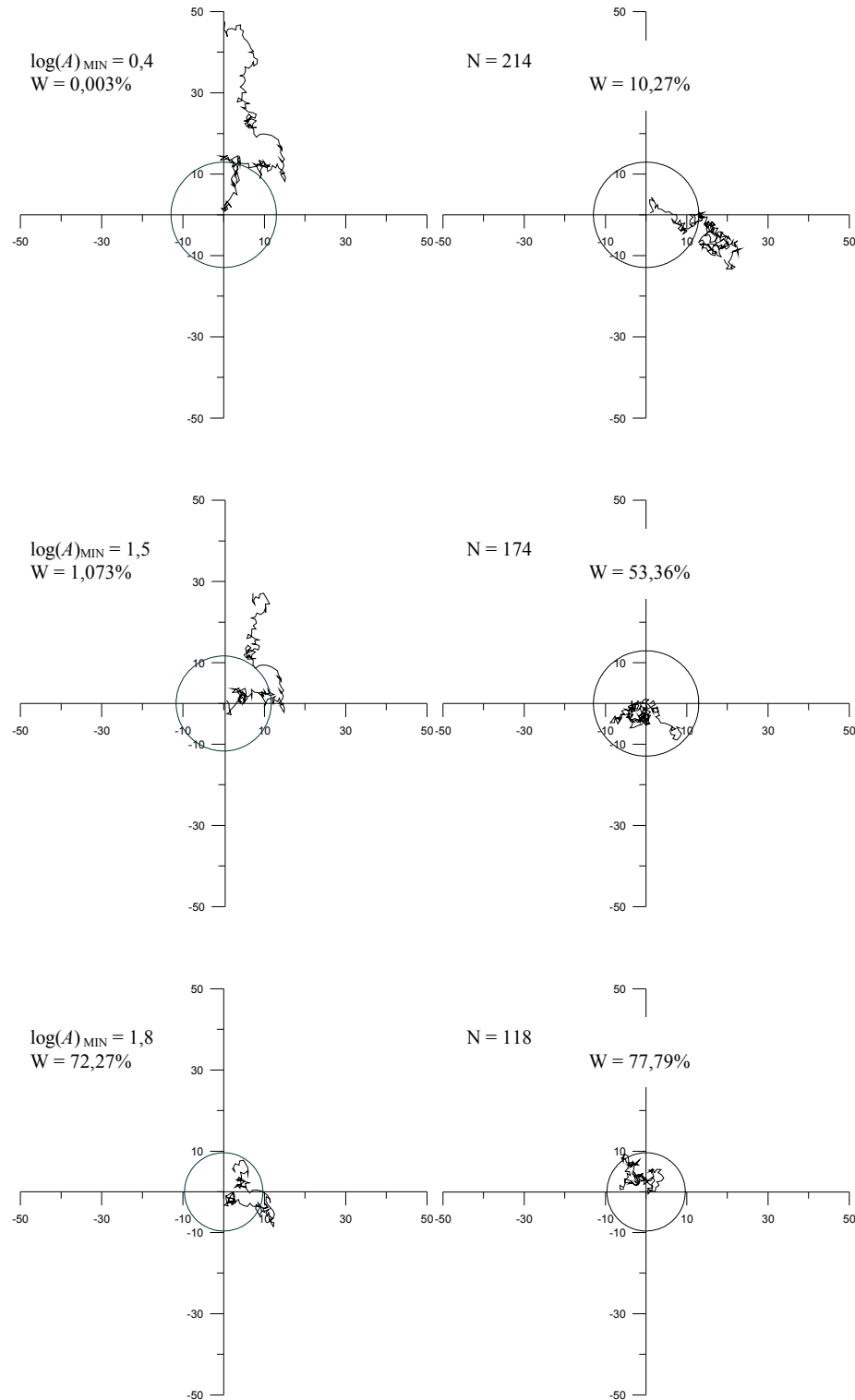


Slika 4. Verjetnost, da je izmerjena oddaljenost R od izhodišča posledica naključne hoje, v odvisnosti od meje logaritma amplitude največjega premika $\log(A)$. Jasno je razvidno, da do vključno meje $\log(A)_{\text{MIN}} = 1,5$ obnašanje potresov ni podobno naključni hoji.

Figure 4. The probability that the measured distance R from the origin is reached by random walk for different lower limits of the logarithm $\log(A)$. The behaviour of the occurrence of the earthquakes is not similar to the random walk up to the limit $\log(A)_{\text{MIN}} = 1.5$.

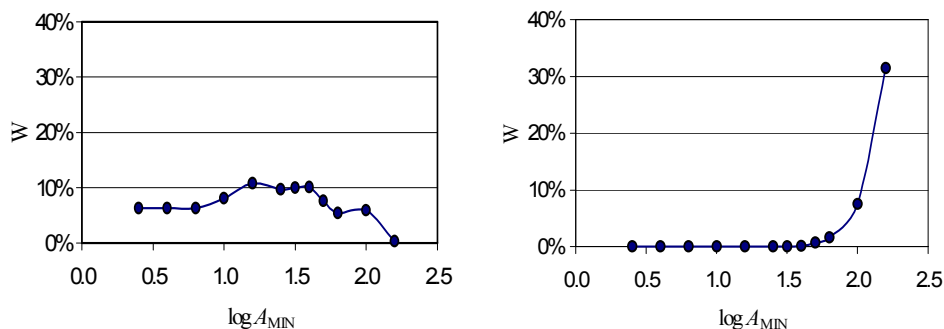
Za kontrolo vpliva količine in izbire podatkov smo naredili še dodatni test. Podatke o potresih smo z ohranjenim kronološkim zaporedjem razdelili na dva enaka dela in vsak del posebej obdelali z enako metodo, kot prej celotno množico podatkov. Če smo prej z metodo zajeli 214 potresov, smo sedaj obdelali ločeno dvakrat po 107 potresov. Pričakovali smo, da bomo za vsak del podatkov dobili rezultate, ki bodo podobni rezultatom dobljenim iz celotnega izbora. Izkazalo se je, da je za drugi del podatkov ta predpostavka držala (slika 6 desno), iz prvega dela podatkov pa smo dobili popolnoma drugačno sliko (slika 6 levo). Iz rezultatov za prvo polovico potresov lahko sklepamo, da smo potrese v tem času prek celega dneva beležili popolnoma naključno. To bi bila lahko posledica večjega šuma prek celega dneva, ki bi zakril razliko med dnevom in nočjo zaradi večjega dnevnega nemira (posledica človeške dejavnosti). Manjše razlike med rezultati celotnega izbora podatkov in rezultati posameznega dela podatkov so seveda tudi posledica slabše statistike zaradi manjšega števila uporabljenih podatkov^{**}.

^{**} Bolj primerljivi skupini podatkov bi dobili, če bi podatke razdelili kronološko, vendar mešano, vsak drugi potres v eno skupino, vsak prvi pa v drugo (hvala recenzentu Bojanu Uranu za predlog)



Slika 5. Nekaj primerov preslikave žariščnih časov na gibanje po ravnini (levo) in po ena od možnih simulacij naključne hoje z enakim številom korakov (desno). Krog označuje pričakovano vrednost oddaljenosti $\langle R \rangle^{(N)}$ od izhodišča. Dodani sta spodnja meja $\log(A)_{\text{MIN}}$ in verjetnost, da je oddaljenost po modelu naključne hoje večja od izmerjene.

Figure 5. Some examples of the mapping of the origin times to the motion on the plane (left) and one of the corresponding random walk simulations with equal number of steps (right). The circle indicates the expected distance $\langle R \rangle^{(N)}$ from the origin. The lower limit $\log(A)_{\text{MIN}}$ and the probability, that the random walked distance from the origin is larger than the measured one are added.



Slika 6. Verjetnost, da je izmerjena oddaljenost R od izhodišča posledica naključne hoje, v odvisnosti od meje logaritma amplitude največjega premika $\log(A)$. Za prvo polovico potresov (levo) je preslikava kvalitativno drugačna kot za drugo polovico (desno), ki ostaja podobna tisti na sliki 4.

Figure 6. The probability that the measured distance R from the origin is reached by random walk for different lower limits of the logarithm $\log(A)$. The first half (left) of the earthquakes behaves qualitatively different than the second half (right), which remains similar to the one, shown on figure 4.

Sklep

Pokazali smo, da lahko s primernim modelom in statistično obravnavo zelo natančno določimo mejo $\log(A)_{\text{MIN}}$, ki loči potrese na tiste močnejše, ki so bili na opazovalnici na Veliki Štangi zabeleženi enakomerno preko celega dne, in na šibkejše, ki so bili pogostejše zabeleženi ponoči. Morda je primernejše uporabiti *amplitudno* mejo, ker je tako definirana občutljivost manj odvisna od oddaljenosti potresa, ki strese tla pod opazovalnico. V primeru Velike Štange je ustrezna amplitudna meja približno 32 nm, kar po naši semiempirični formuli za $r = 7$ km in $t/T = 20$ ustreza $M_{\text{VSTG}} = 0,3$.

Predstavljeno metodo naključne hoje lahko uporabimo za analizo občutljivosti na katerikoli od naših stalnih opazovalnic, če le imamo dovolj zabeleženih potresov za zanesljivo statistiko. S tako analizo bi lahko ovrednotili kvaliteto posamezne opazovalnice za detekcijo potresnih valov in jo uporabili pri izbiri novih lokacij za potresne opazovalnice, ki jih načrtujemo v bližnji prihodnosti, vendar bi meritve na izbrani lokaciji morale potekati dovolj časa, da bi število zabeleženih potresov zagotovilo dovolj zanesljivo statistiko meritev.

Literatura

- Cecić, I., Živčič, M., Gosar, A., Jesenko, T., 1999. Potresi v Sloveniji leta 1998. V: Lapajne, J., Potresi v letu 1998, 11-48, Uprava RS za geofiziko, Ljubljana.
- Kuščer, I., Kodre, A., 1994. Matematika v fiziki in tehniki. Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije, 394 pp, Ljubljana.
- Michellini, A., Živčič, M., Suhadolc, P., 1998. Simultaneous inversion for velocity structure and hypocenters in Slovenia. *Journal of Seismology* 2, 257-265.
- Udias, A., 1999. Principles of seismology. Cambridge University Press, 475 pp, Cambridge.