

PREDHODNIKI (ZNANILCI) POTRESOV – PREGLED OPAZOVANJ IN POJASNJEVALNIH MODELOV

Earthquake Precursors – Overview of Observations and Explanatory Models

Andrej Gosar* UDK 550.343

Povzetek Abstract

Čeprav kratkoročno napovedovanje potresov ni mogoče in verjetno še zelo dolgo ne bo, potekajo v svetu intenzivne raziskave o predhodnih pojavih potresov. Merilom kredibilnega opazovanja in obstoja pojasnjevalnih modelov ustrezajo predvsem spremembe električnih in magnetnih polj, emisije plinov, spremembe gladine podtalnice, spremembe temperature, deformacije površja in anomalna seizmičnost. Največ je podatkov o emisijah plinov, predvsem o spremembah koncentracije radona, sledijo anomalije električnih in magnetnih polj ter spremembe nivoja podtalnice. V članku je podan pregled objavljenih opazovanj, kot tudi odvisnosti anomalij od moči potresa, oddaljenosti od nadžarišča in njihov časovni potek pred potresom. Za vsak pojav so opisani fizikalni ali kemični modeli, ki poskušajo pojasniti njegov nastanek.

Although short-term prediction of earthquakes is not possible and most likely will not be possible for quite some time, earthquake precursors are intensively studied across the whole world. The most important precursors which fulfil the criteria of credible observations and existence of explanatory models are changes in electric and magnetic fields, gas emissions, groundwater level changes, temperature changes, surface deformations and anomalous seismicity. The largest amount of data is available for gas emissions (especially changes in concentration of radon), following the anomalies in electric and magnetic fields, and groundwater level changes. In this article an overview of published observations is given as well as anomalies on the magnitude of the earthquakes, epicentral distance and their time course. For each phenomenon, physical or chemical models are given.

Uvod

Napovedovanje potresov je tema, ki vedno znova vznemirja strokovno in predvsem laično javnost po vsem svetu. V sredini 70. let prejšnjega stoletja so bila pričakovanja glede možnosti kratkoročnega napovedovanja potresov precej optimistična (Lomnitz, 1994). Tak optimizem je spodbudila predvsem uspešna napoved potresa leta 1975 v Haichengu na Kitajskem ($M = 7,4$), na podlagi katere so 24 ur pred glavnim potresom začeli evakuacijo prebivalstva, ki je nedvomno preprečila veliko število žrtev, mrtvih je bilo tako »le« 1328. Udarec prevelikim pričakovanjem pa je zadal potres, ki se je zgodil le 18 mesecev pozneje, leta 1976 v Tangshanu, prav tako na Kitajskem ($M = 7,8$). Ta potres ni bil napovedan in je zahteval kar 255.000 žrtev, kar ga uvršča na tretje me-

sto po številu mrtvih zaradi potresa vseh časov (Geller, 1997). V Evropi je pred kratkim številne polemike sprožila domnevna napoved potresa 6. aprila 2009 v L'Aquila v srednji Italiji ($M_w = 6,3$), ki je zahteval 307 žrtev. O napovedovanju potresov je bil v prvih letnikih Ujme že objavljen niz člankov (Lapajne, 1990, 1991, 1992).

Čeprav vlada med seizmologi precej enotno prepričanje, da kratkoročno napovedovanje potresov ni in predvidoma še zelo dolgo ne bo mogoče, pa potekajo intenzivne raziskave pojavov, ki spremljajo potrese, predvsem seveda potresom predhodnih pojavov ali tako imenovanih znanilcev potresov. Predmet teh raziskav torej ni napovedovanje potresov, temveč razumevanje dogajanja v Zemljini skorji pred močnejšimi potresi in ocena možnosti, ali bi bilo to razumevanje mogoče nekoč uporabiti tudi za napovedovanje. Ker je to področje, ki privablja tudi številne kvazistrokovnjake, je zelo pomembno, da potekajo te raziskave na resni znanstveni podlagi. Po potresih se namreč pogosto pojavijo pričevanja o različnih nena-

* dr, Ministrstvo za okolje in prostor RS, ARSO,
Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska 47, Ljubljana,
andrej.gosar@gov.si

vadnih pojavih (na primer nenavadno vedenje živali ali spremembe gladine podtalnice), ki pa niso kvantitativno ovrednoteni in znanstveno dokumentirani. Namen tega prispevka je predstaviti tiste predhodnike potresov, ki so bili že velikokrat opazovani na kredibilen način, predvsem z nadzorovanimi in kalibriranimi poskusi. Poleg tega morajo biti zanje podani modeli (fizikalni, kemični itn.), ki poskušajo pojasniti nastanek posameznega predhodnika. Glavni predhodniki potresov, ki ustrezajo merilom kredibilnega opazovanja in obstoja pojasnjevalnih modelov, so (Cicerone in sod., 2009):

- spremembe električnih in magnetnih polj,
- emisije plinov,
- spremembe gladine podtalnice,
- spremembe temperature,
- deformacije površja,
- seizmičnost.

Spremembe električnih in magnetnih polj

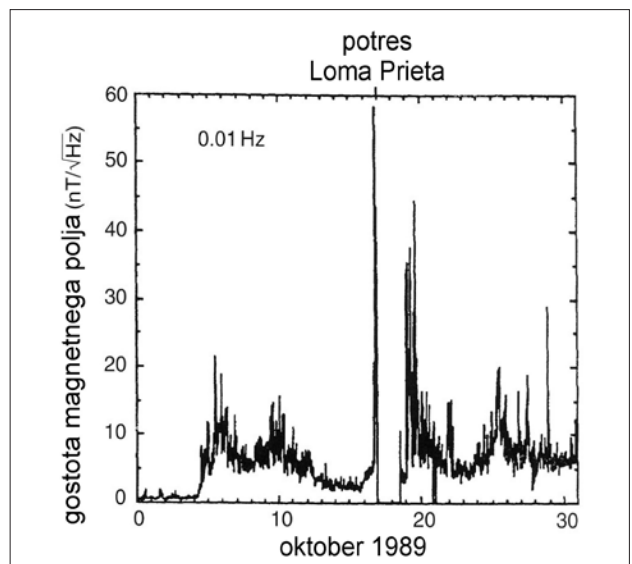
Obstaja nekaj pomembnih opazovanj, ki potrjujejo, da lahko Zemlja pred močnejšim potresom tvori anomalne električne in magnetne signale. Najpomembnejše je bilo opazovanje močne spremembe ultranizkofrekvenčnega (ULF) magnetnega polja blizu nadžarišča potresa Loma Prieta v Kaliforniji, ki se je zgodil 17. oktobra 1989 ($M_s = 7,1$). Magnetometer, ki je sicer zapisoval elektromagnetne motnje, ki jih povzročajo električni vlaki, je bil nameščen 7 kilometrov od bodočega nadžarišča potresa (Fraser-Smith et al., 1990). En mesec pred potresom se je nizkofrekvenčno (0,5–2,0 Hz) polje ozadja začelo počasi krepiti. Približno dva tedna pred potresom pa se je raven ULF-signala opazno dvignila (slika 1). Končno se je nekaj ur pred potresom amplituda pri frekvencah 0,01–0,5 Hz znatno povečala in naraščala do trenutka potresa. Potres je žal prekinil napajanje inštrumenta, zato se meritve niso nadaljevale. So pa lahko izločili atmosferske vplive kot mogoč vir opazovanih anomalij. Drug inštrument, ki je meril ekстранizkofrekvenčno (ELF) in zelonizkofrekvenčno (VLF) polje 52 kilometrov od nadžarišča potresa, pa v tem času ni zaznal nobenih anomalij.

Ruski raziskovalci so poročali o dveh anomalnih opazovanjih ELF- in VLF-magnetnega polja s satelitov, povezanih z močnejšimi potresi ali popotresi (Serebryakova et al., 1992). To so edini predhodniki potresov, ki so bili opazovani tudi s satelitov.

Za pojasnitev elektromagnetnih anomalij so postavili več hipotez ali modelov, ločeno za ULF-magnetna polja in ELF/VLF/LF/HF-električna polja. LF označuje nizkofrekvenčna in HF visokofrekvenčna polja.

Pojasnjevalni modeli ULF-magnetnih polj so:

- *magnetohidrodinamični (MHD) učinek*: pri tem mehanizmu povzroča tok električno prevodne tekočine v



Slika 1: Amplituda gostote magnetnega polja kot funkcija časa pred potresom in po njem ($M = 7,1$), Loma Prieta (Kalifornija) 17. oktobra 1989, kot ga je izmeril ultranizkofrekvenčni senzor v Corralitosu, 7 km oddaljenem od nadžarišča. Povečan signal so zaznali v dveh tednih pred potresom. (Johnston, 2002)

Figure 1: Magnetic field amplitude as a function of time before and after the Loma Prieta (California) earthquake ($M=7.1$) on 17 October 1989 recorded with Ultra Low Frequency receiver at Corralitos, 7 km from the epicenter. Increased signal was recorded two weeks before the earthquake. (Johnston, 2002)

prisotnosti magnetnega polja sekundarno inducirano polje;

- *piezomagnetni učinek*: pod vplivom mehanske napetosti se spremeni magnetizacija v feromagnetnih kamninah, kar povzroči indukcijo sekundarnega magnetnega polja;
- *elektrokinetični učinek*: ta učinek je posledica električnih tokov v Zemlji v prisotnosti naelektrene površine med trdno kamnino in tekočino. Ti električni tokovi pa povzročajo spremenljivo magnetno polje.

Analizirali so relativne prispevke vsakega izmed teh treh mehanizmov na primeru potresa Loma Prieta (Fenoglio et al., 1995). Pri tem so se osredotočili na prvo anomalijo z amplitudo 2,0 nT, ki je nastala 12 dni pred potresom, in na drugo anomalijo z amplitudo 6,7 nT, ki je nastala tri ure pred potresom. Te analize so pokazale, da je magnetohidrodinamični učinek v ULF-signalu zanemarljiv, predvsem zaradi hitrega dušenja gostote magnetnega polja, ki je sorazmerno z $1/r^3$. Piezomagnetni učinek prispeva k inducirane magnetnemu polju največ 10^{-2} nT, kar je dva reda velikosti manj, kot so bile opazovane anomalije. Elektrokinetični učinek je zato najpomembnejši in prispeva k inducirane magnetnemu polju okoli 5–10 nT.

Pojasnjevalni modeli ELF/VLF/LF/HF-električnih polj so:

- *kontaktne ali ločevalne elektrifikacija in piezoelektrifikacija*: te mehanizme so opazovali, če so vzorce granita

udarili s kladivom ali z upogibanjem povzročili njihovo razpokanje. Opisani mehanizmi temeljijo na nastanku dipolnega momenta zaradi ločitve pozitivno in negativno nabitih delcev kamnine. Kot posledica nastane električno polje. Pri potresih nastanejo domnevno inducirana polja v VLF-območju in radiacijska polja v LF-frekvenčnem območju;

- *tvorjenje atmosferskih električnih polj z emisijo radona iz Zemljine skorje*: radon po tem modelu tako spremeni nekatere parametre v atmosferi, da vplivajo na atmosfersko elektriko. Pri tem gre predvsem za prevodnost blizu tal ob suhem vremenu in električno polje oziroma za potencialne gradiente. Ta model predvideva, da se prevodnost blizu tal lahko poveča za 50 odstotkov, električno polje pa se zmanjša za 30 odstotkov.

Emisije plinov

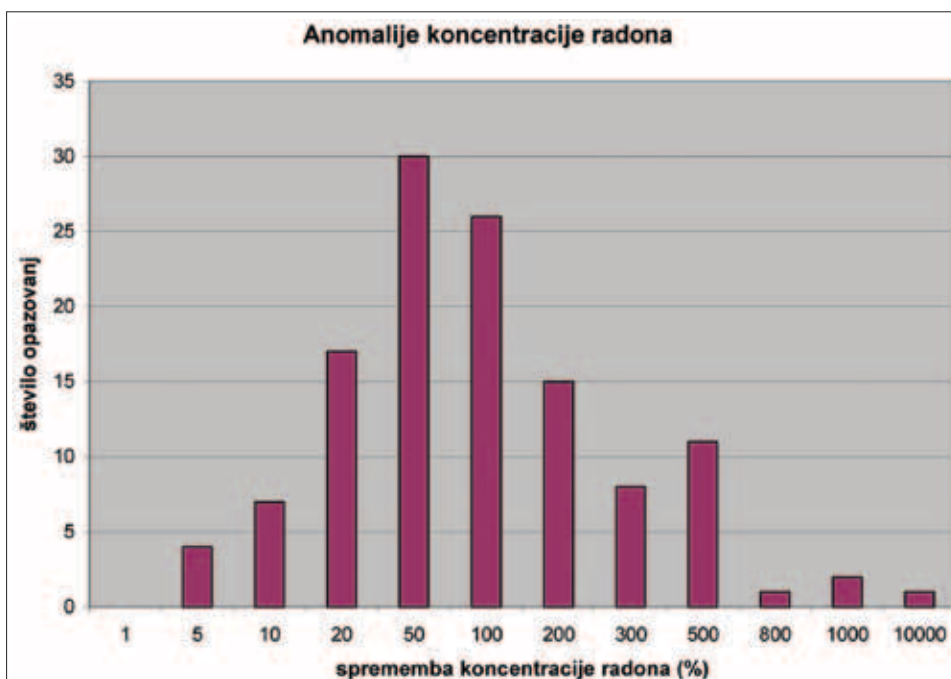
Že v 60. in 70. letih prejšnjega stoletja so poročali, da se koncentracije radona v tleh pred pojavom potresov domnevno spremenijo. To je spodbudilo številne poskuse po vsem svetu, v katerih so zvezno opazovali koncentracije radona v tleh in iskali korelacije med njihovimi spremembami in seizmičnostjo. Ker je radon radioaktiven, ga je precej preprosto instrumentalno opazovati. Zaradi kratke razpolovne dobe (3,8 dneva) je tudi mogoče zaznati kratkočasovne spremembe v njegovi koncentraciji z visoko ločljivostjo. Čeprav so kot mogoče znanilce potresov proučevali tudi druge pline, je večina poskusov osredotočena na radon (Thomas, 1988; Toutain in Baubon, 1999; Ghos in sod., 2009).

V literaturi je opisanih 159 opazovanj sprememb emisij plinov pred 107 potresi. Od tega je 125 opazovanj radona pri 86 potresih, 7 opazovanj vodika, 7 opazovanj helija, 10 opazovanj razmerja helij/argon, 4 opazovanja razmerja metan/argon, 3 opazovanja razmerja dušik/argon, 2

opazovanji klorovih ionov in eno opazovanje živosrebrnega plina. Obstajajo tudi poročila o spremembah emisij drugih plinov, kot so ogljikov monoksid in ogljikov dioksid, vendar za ta dva plina ni na voljo zanesljivih meritev.

Območje magnitud potresov, za katere so poročali o predhodnih anomalijah emisij radona, je zelo široko, in sicer od 1,5 do 7,9, vendar se večina opazovanj nanaša na potrese z magnitudo, večjo od 4,0. Večina sprememb je v območju med 20 in 200 odstotki, pri čemer prevladujejo tiste v območju med 50 in 100 odstotki (slika 2). Pri 83 odstotkih opazovanj se je koncentracija radona v tleh pred potresom povišala. Večina anomalij se je začela znotraj tridesetih dni pred potresom (slika 3). V nekaterih primerih so se anomalije končale že pred potresom, pri drugih pa so trajale tudi po potresu (slika 6[1]). Zato zbrani podatki ne kažejo na neki značilen potek (začetek in konec) anomalije v emisiji radona glede na trenutek potresa. Največ, kar lahko za zdaj sklepamo, je, da se potres zgodi znotraj enega meseca od začetka povečane emisije radona. Največje anomalije so opazovali v neposredni bližini nadžarišča, kar kaže na to, da so emisije povezane z nekim procesom v prelomni coni ali blizu nje. Po drugi strani se zdi, da velikost anomalije ni odvisna od magnitude prihajajočega potresa. To, kar povzroča povečano emisijo radona, torej ne vpliva na moč potresa. Zaradi razpršenosti podatkov tudi sicer niso mogli ugotoviti sistematične odvisnosti anomalij radona od oddaljenosti potresa ali njegove magnitude. Analiza odvisnosti magnitude potresa od časa začetka anomalije pred potresom in njenega trajanja je pokazala, da so močnejši potresi pogostejše povezani z anomalijami, ki so se začele v daljšem časovnem intervalu pred potresom in so tudi dlje trajale.

Za druge pline so zaradi majhnih števil opazovanj podatki precej manj zanesljivi. Nekateri izmed teh plinov (H_2 , He/Ar, Cl) kažejo povečanje koncentracij pred po-

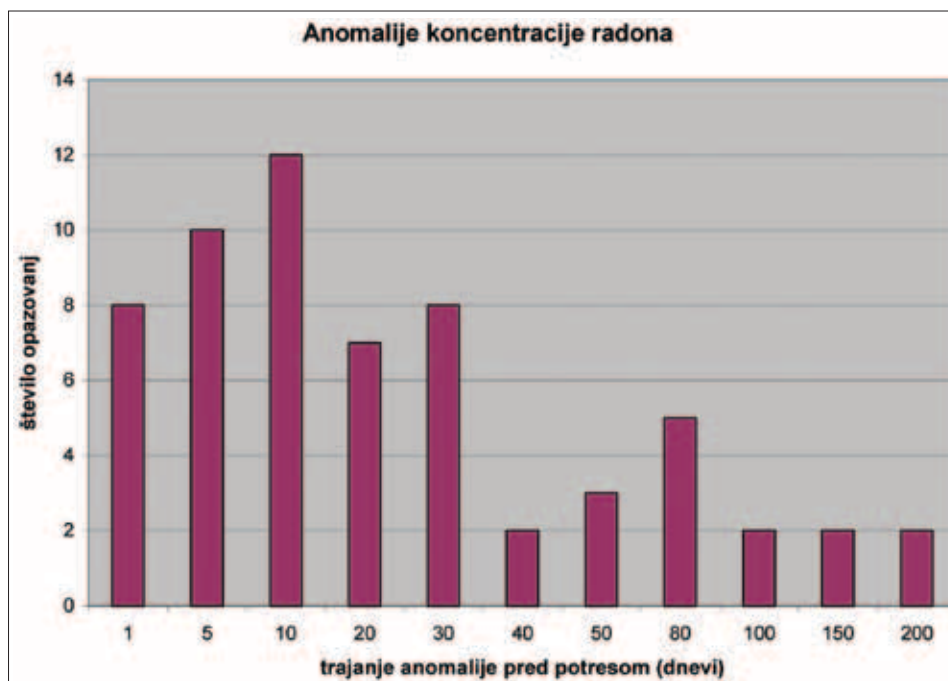


Slika 2:

Porazdelitev opazovanih največjih sprememb v koncentraciji radona v tleh (v odstotkih glede na raven ozadja) pred potresi. Večina sprememb je med 20 in 200 odstotki. (Cicerone in sodelavci, 2009)

Figure 2:

Distribution of observed maximum changes in radon gas concentrations in the grounds (in percent relative to the background level) prior to earthquakes. Most of the changes are between 20 % and 200 %. (Cicerone et al., 2009)



Slika 3:
Porazdelitev opazovanih časov začetkov anomalij v koncentraciji radona pred potresom. Večina anomalij se je začela znotraj 30 dni pred potresom. (Cicerone in sodelavci, 2009)

Figure 3:
Distribution of observed times of the initiation of anomalies in the concentration of radon prior to the earthquake. Most of the anomalies began within 30 days of the earthquake. (Cicerone et al., 2009)

tresom, He, CH₄/Ar in N₂/Ar pa kažejo na zmanjšanje koncentracij.

Pojasnjevalni modeli za emisije plinov (predvsem radona) so (Thomas, 1988):

- *fizikalno in/ali kemično sproščanje zaradi ultrazvočnih vibracij*: ta model predpostavlja, da se lahko slabo vezane sestavine v kamninah sprostijo zaradi ultrazvočnih vibracij. Laboratorijske raziskave so pokazale, da kamnine bolj reagirajo z vodo, kadar so pod vplivom ultrazvočnih vibracij. In-situ raziskave pa so pokazale, da prihaja tudi pri umetnih podzemnih eksplozijah do geokemičnih anomalij. Kritiki tega modela trdijo, da so razmeroma visoke frekvence, ki so potrebne za sprostitvev kemičnih elementov iz kamnine, prešibke ali v celotni odsotne v frekvenčnem spektru potresa. Geokemične anomalije, povezane z eksplozijami, so tudi znatno manjše od tistih, povezanih s potresi. Geokemične anomalije, povezane z umetnimi eksplozijami, nastanejo tudi nekaj časa po eksploziji, kar nakazuje, da je mehanizem njihovega nastanka drugačen kot pri potresih;
- *kemično sproščanje zaradi odvisnosti topnosti od pritiska*: ta model predpostavlja, da pride zaradi povečevanja pritiska v Zemljini skorji pred potresom do povečanja raztopljenih snovi v podtalnici. Ni verjetno, da bi ta mehanizem znatno prispeval k nastanku geokemičnih anomalij, ker so potrebne spremembe pritiska od nekaj deset do nekaj sto barov. Čeprav so spremembe napetosti v kamnini te velikosti običajne za potrese, ni skoraj nobenih dokazov, da se napetosti prenašajo tudi na tekočine v porah kamnine;
- *fizikalno sproščanje zaradi zapiranja por*: ta model predpostavlja, da ko se napetost v skorji pred potresom povečuje, pride do kolapsa oziroma zapiranja por, kar povzroči sproščanje kemijskih elementov v podtalnico. Zmanjševanje prostornine por zaradi povečanega pritiska so opazovali v številnih laboratorij-

skih in terenskih raziskavah. Kljub temu pa ni znano, kako pomemben je ta mehanizem za nastanek geokemičnih anomalij pred potresi. Laboratorijski poskusi kažejo, da se zmanjšanje prostornine por zgodi pri razmeroma majhnih spremembah napetosti in da je to zmanjšanje majhno. Po drugi strani visoka napetost, ki deluje na porozno kamnino, pri večini kamnin povzroči povečanje porne prostornine. Drugi pomislek glede tega mehanizma temelji na tem, da je zmanjšanje porne prostornine ireverzibilen proces, kar ne ustreza ciklični naravi geokemičnih anomalij, značilnih za znanilce potresov;

- *kemično sproščanje zaradi nastanka mikrorazpok ali reakcije fluidov z novonastalo površino kamnine*: ta model predpostavlja, da se zaradi mikrorazpok, ki nastanejo v kamnini pred močnejšimi potresi, poveča koncentracija ionov in plinov v podtalnici. Nastajanje razpok ima dva učinka. Prvi učinek je, da omogoča sicer ujetim plinom, da uidejo iz matriksa kamnine. Drugi učinek pa je, da povzroči nastajanje sveže silikatne površine, ki naj bi omogočala povečanje reakcije s podtalnico. Laboratorijske raziskave kažejo, da mikrorazpoke in z njimi povezano raztezanje lahko znatno povečajo poroznost kamnin, in sicer od 20 do celo 400 odstotkov. Reakcije s svežo površino kamnine tudi znatno povečajo koncentracijo ionov v podtalnici. Laboratorijske raziskave so pokazale tudi, da se sproščanje žlahtnih plinov, predvsem radona, lahko znatno poveča pri napetostih, ki povzročajo nastanek mikrorazpok. Največja negotovost glede tega mehanizma je dejstvo, da so laboratorijske študije pokazale, da sta raztezanje kamnin in z njim povezano povečanje prostornine por pomembna le pri kamninah, ki so blizu porušitve. To pa kaže, da je ta mehanizem omejen le na majhno prostornino kamnine blizu preloma. To dejstvo je v nasprotju s tem, da so geokemične anomalije opazovali tudi zelo daleč od seizmogenih prelomov. Po drugi strani nekateri trdijo, da ta model ne upošteva pomena koro-

zijskega razpokanja in subkritičnega povečevanja razpok, ki lahko nastane pri razmeroma nizkih napetostih, če je vsebnost vode v kamnini visoka;

- *fizikalno mešanje zaradi sprememb v vodonosnikih in/ali mešanja fluidov*: ta model predpostavlja, da pride do geokemičnih anomalij zaradi mešanja fluidov iz dveh pred tem ločenih vodonosnikov. Prednost tega modela je, da lahko razloži tako povečanje kot tudi zmanjšanje koncentracije ionov in plinov ter hkratne spremembe temperature, ki pogosto spremljajo geokemične značilnice. Mehanizem temelji na domnevi, da zaradi nastanka razpok v pregradi, ki sicer loči dva vodonosnika, pride do mešanja fluidov. S tem mehanizmom, ki so ga imenovali elektrokinetični mehanizem, so poskusili pojasniti tudi nastanek prehodne ULF-magnetne anomalije pred potresom Loma Prieta.

Spremembe gladine podtalnice

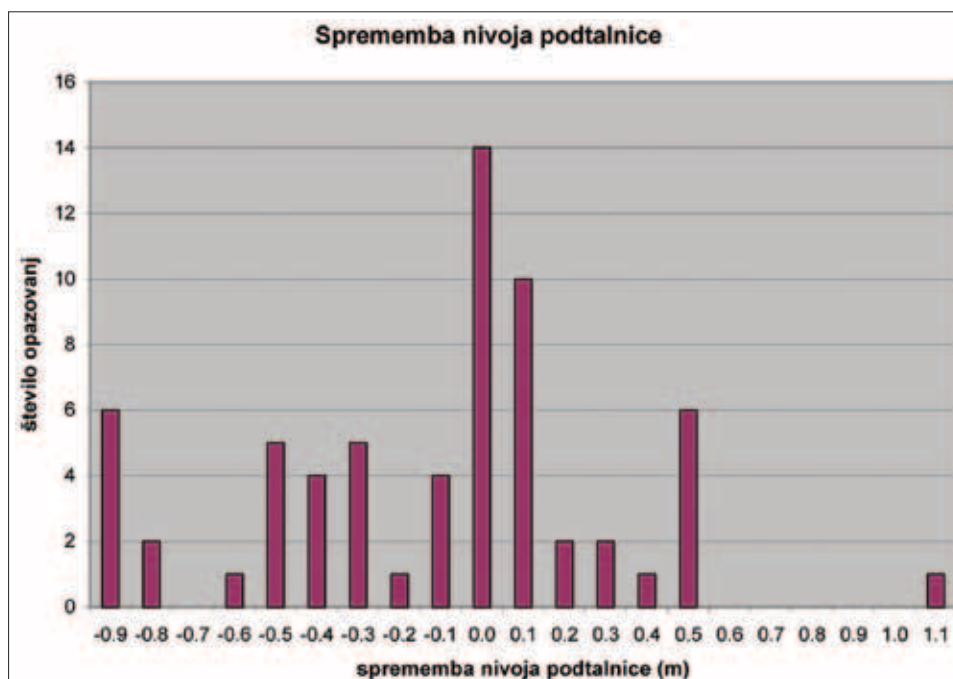
Poročila o spremembah nivoja podtalnice pred potresi segajo zelo daleč v zgodovino. To je zaradi pomena pitne vode razumljivo, posebno, kadar je šlo za presahnitev vodnih virov. Žal je večina tovrstnih poročil nezanesljivih in ne omogočajo resne znanstvene obravnave. Kljub temu obstaja 52 zanesljivih opazovanj, povezanih z 32 potresi, večinoma zelo močnimi. Večina opazovanj je z območij, oddaljenih od nadžarišča potresa do 200 km, najbolj oddaljeno opazovanje pa je bilo 530 km daleč od potresa. Največji opazovani spremembi sta 15 m znižanja ali 8 m zvišanja nivoja gladine podtalnice. Pri večini opazovanj pa je sprememba nivoja gladine manjša od 1 m (slika 4). V 72 odstotkih primerov se je nivo gladine pred potresom znižal (slika 5 a, slika 6 c). V večini primerov je prišlo do največje spremembe nivoja do 40 dni pred potresom, pri čemer je začetek nastajanja anomalije lahko segal do enega leta ali več pred potresom. V splošnem so bile največje anomalije opazo-

vane blizu nadžarišča potresa, časovna oddaljenost in amplituda anomalije pa se povečujeta z močjo potresa. Večina opazovanih parametrov (začetek nastanka anomalije, čas največje anomalije, odvisnost amplitude anomalije od magnitude potresa in nadžariščne razdalje) je podobnih kot pri anomalijah radona. To si lahko razlagamo s tem, da sta oba pojava povezana s spremembami v prepustnosti in poroznosti kamnin v tednih pred nastankom potresnega pretrga. Ob potresu so spremembe nivoja podtalnice pogoste (slika 5), vendar so odzivi v različnih vodonosnikih različni.

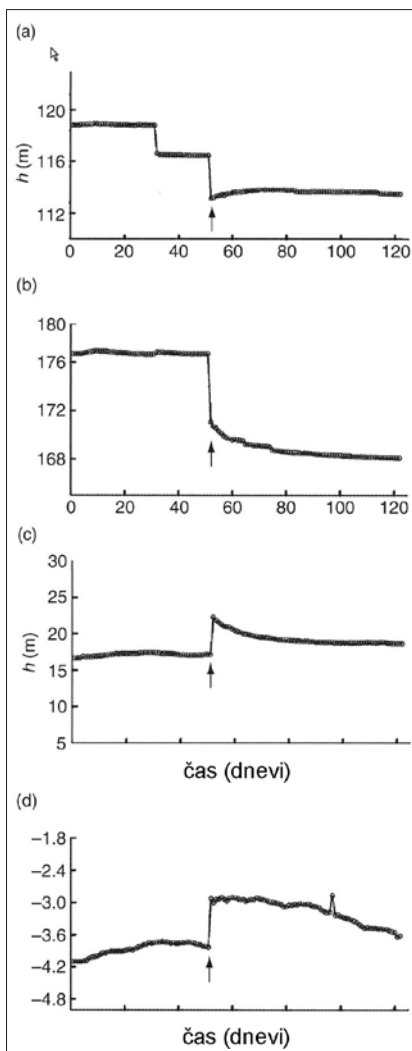
Modeli, ki pojasnjujejo spremembe v nivoju podtalnice pred potresi, temeljijo na odzivu na prostorninsko deformacijo v Zemljini skorji (Roeloffs, 1988). Pred obravnavanjem tega odziva moramo seveda odstraniti vse ne-tektonske vplive na nivo podtalnice, kot so spremembe vračnem pritisku, vplivi plimovanja, padavine in črpanje vode ali nafte in plina. Največje spremembe nivoja podtalnice pred potresi so opazovali v zaprtih vodonosnikih. Za tipične vrednosti strižnega modula in nedreniranega Poissonovega količnika ustreza v zaprtem vodonosniku deformaciji 10^{-6} sprememba v nivoju podtalnice amplitude 52 cm. V primeru kompresijske deformacije se nivo zviša, v primeru dilatacije pa zniža. V odprtem vodonosniku je sprememba nivoja odvisna od poroznosti in višine nasičenosti z vodo. Pri 2-odstotni poroznosti in 100 m debelini nasičenja z vodo je v odprtem vodonosniku pri deformaciji 10^{-6} sprememba nivoja podtalnice le 0,5 cm, torej znatno manj kot pri zaprtem vodonosniku.

Spremembe temperature

Malo poročil je o spremembi temperature pred potresi, kar je verjetno predvsem posledica dejstva, da je takih poskusov malo. Ker je toplotna prevodnost kamnin nizka, je za opazovanje morebitnih sprememb v žariščnem



Slika 4:
Porazdelitev opazovanih največjih sprememb v nivoju podtalnice pred potresi (Cicerone in sodelavci, 2009)
Figure 4:
Distribution of observed maximum changes in the level of groundwater prior to earthquakes. (Cicerone et al., 2009)

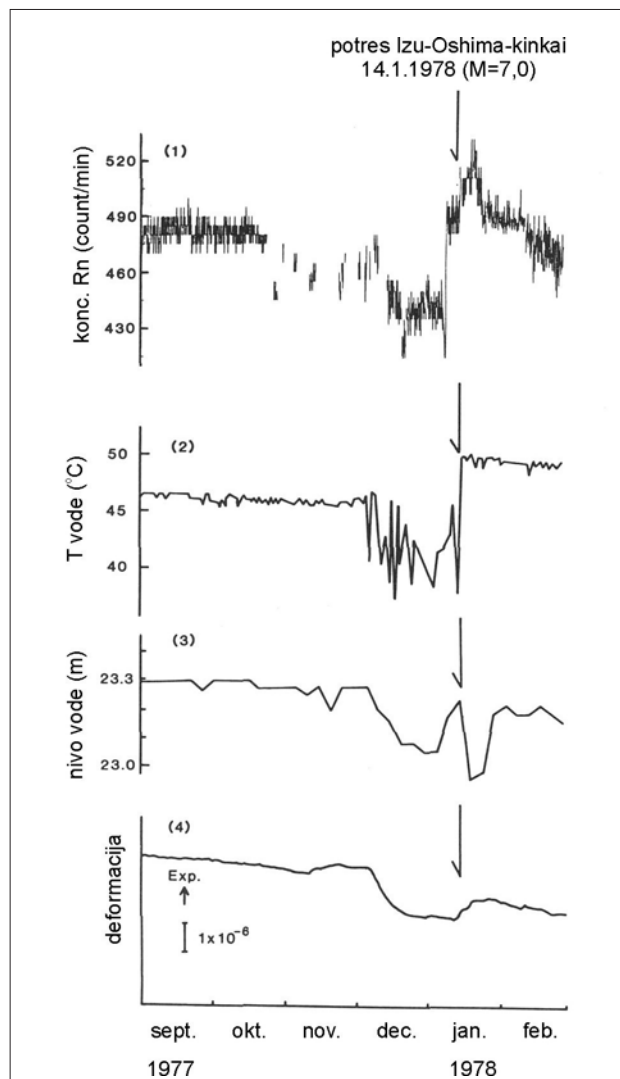


Slika 5:
Štiri vrste odziva gladine podtalnice na potres (M = 7,3) Chi-Chi na Tajvanu 21. septembra 1999 v različnih vrtinah (Manga in Wang, 2009)
Figure 5:
Four types of groundwater level response to the Chi-Chi (Taiwan) earthquake (M=7.3) on 21 September 1999 in different wells. (Manga and Wang, 2009)

območju prevodnost zanemarljiva, saj traja kar nekaj let, da se sprememba temperature s prevajanjem preneše nekaj metrov daleč v kamnini. Zato je prenos toplote skoraj popolnoma odvisen le od konvekcije oziroma od toka vode skozi kamnino. Opazovali so različne geotermalne sisteme, v katerih hladna voda s površja potuje v globino, kjer se ob topli kamnini segreje in se po drugi poti vrača nazaj proti površini. To je posebno značilno za vulkanska območja in območja z aktivno tektoniko, kjer lahko pričakujemo tudi potrese. Spremembe v poroznosti in prepustnosti v globini, do katerih pride pred nastankom potresa in so opisane v predhodnem poglavju, vplivajo torej tudi na prenos toplote s kroženjem vode. Aktivni tektonski procesi pred potresom lahko omogočijo povečan dostop vode do vroče kamnine in tako povečanje temperature blizu površine. Po drugi strani pa lahko pride do prekinitve toka tople vode proti površju in posledično do znižanja temperature (Cicerone in sod., 2009).

V literaturi je opisanih 15 opazovanj sprememb temperature zaradi 12 potresov v magnitudnem območju 2,3–7,0. Deset opazovanj je iz vročih izvirov na vulkanskih območjih, večina izmed njih je oddaljenih manj kot 50 km od nadžarišča potresa. V vseh primerih so opazovali povišanje temperature, večina povišanj je bila manj-

ša od 1 °C, največje pa 6 °C . Pet opazovanj je bilo koseizmičnih, torej so anomalije nastale ob potresu, pet opazovanj pa se nanaša na spremembe v desetih dneh pred potresom. Vsa opazovanja sprememb temperature so iz Grčije in Japonske (slika 6), kjer gre za aktivno subdukcijo, aktivni vulkanizem in številne spremljajoče geotermalne pojave. Žal pa ni znano, ali je pred potresi prišlo do kakšnih anomalij tudi na negeotermalnih območjih v teh državah. Vzdolž preloma Sv. Andreja v Kaliforniji, ki je potresno zelo dejaven, ni znanih geotermalnih anomalij,



Slika 6: Spremembe pred potresom (M = 7,0) Izu-Oshima-kinkai na Japonskem 14. januarja 1987. 1) Koncentracija radona v vrtini, oddaljeni 25 km. 2) Spremembe temperature vode v 500 m globoki vrtini, oddaljeni 30 km. 3) Spremembe nivoja vode v isti vrtini. 4) Deformacije, izmerjene v 50 km oddaljeni vrtini. (Wakita in sodelavci, 1988)

Figure 6: Changes before the 1978 Izu-Oshima-kinkai earthquake (M=7.0) in Japan on 14 January 1987. 1) Radon concentrations observed in a well at 25 km distance. 2) Water temperature variations observed in a 500 m deep well at 30 km distance. 3) Water level variations in the same well. 4) Strain changes measured in a well 50 km away. (Wakita et al., 1988)

kar je nepričakovano, saj bi strižne deformacije ob številnih močnejših potresih morale sprostiti dovolj toplotne energije, da bi se ta odrazila v povišanju temperature. To bi lahko pomenilo, da na negeotermalnih ali vulkanskih območjih ne prihaja do temperaturnih sprememb, povezanih s potresi.

Temperaturne anomalije pred potresi povezujejo predvsem s spremembami v nivoju podtalnice in z geokemičnimi anomalijami, čeprav lahko tudi trenje ob prelomni ploskvi prispeva k povišanju temperature. Zaradi počasnosti toplotnega prevajanja skozi kamnine so vse spremembe temperature blizu površin posledica konvekcijskega toka. Če predpostavimo, da sta nastajanje razpok ter sprememba poroznosti in prevodnosti pomembni posledici deformacij kamnine pri pripravljanju na močan potres, je povečana konvekcija glavni vzrok za temperaturne anomalije. Pri tem lahko povečana poroznost in prevodnost omogočita tudi globlje kroženje vode in posledično povišano temperaturo. Povišanje temperature bo torej odvisno od povečane globine kroženja vode, temperature v tej globini, hitrosti potovanja iz globine proti površju in razmerja med prostornino vode v globini in v plitvem vodonosniku, kjer spremembo temperature opazujemo.

Deformacije površja

Pred številnimi močnejšimi potresi so opazovali deformacije površja. Te so lahko različne: dvig, pogrezanje, nagib, vodoravni premik ali sprememba v stopnji deformacije. Žal je bilo do pred kratkim take deformacije zelo težko izmeriti. Za območja, velika nekaj deset kilometrov, so bile najprimernejše geodetske metode niveliranja in laserskih meritev, ki pa so razmeroma zamudne in drage, saj jih je treba ponavljati v čim krajših časovnih intervalih. Zdaj ko sta na voljo globalni sistem lociranja (GPS) in satelitska interferometrija (SAR), je mogoče ponavljati meritve celo na nekaj minut ali vsaj na nekaj dni. Ker sta novi tehnologiji na voljo še premalo časa, še ni opisanih veliko opazovanj, povezanih z močnimi potresi. V literaturi so tako predvsem podatki klasičnih geodetskih meritev na površju in meritev v vrtnah, ki obsegajo 12 meritev nagiba ob devetih različnih potresih, pet meritev deformacij ob dveh potresih in tri meritve spremembe hitrosti deformacije ob enem potresu. Gre za potrese v območju magnitud od 3,0 do 7,1, večina opazovanj pa je bila opravljenih na nadžariščnih razdaljah, manjših od 100 km. Opazovane deformacije so se zgodile od nekaj mesecev do nekaj dni pred potresom (slika 6 d), največje amplitude deformacij in nagibov pa so povezane z najmočnejšimi potresi (Cicerone in sod., 2009).

Modeli, ki pojasnjujejo deformacije površja pred potresi, neposredno odražajo naše zmožnosti pojasniti dogajanje ob prelomih. Vrsta premika ob prelomu je odločilna za to, kakšno deformacijo površja lahko pričakujemo. Mehanika dogajanja ob prelomu je odvisna od napetostnega polja in trenja na prelomi ploskvi. Najbolj so raziskani

zmični prelomi, ob katerih dva bloka drsita vodoravno ob navpičnem ali malo nagnjenem prelomu. Te raziskave kažejo, da je najboljši parameter za opazovanje sprememba v hitrosti deformacije, ker je razmerje med signalom in motnjami pri tem parametru najboljše.

Seizmičnost

Pred številnimi močnimi potresi se pojavljajo šibkejši potresi, imenovani predpotresi (angl. foreshocks). Pojavljajo se lahko znotraj nekaj ur, dni ali tednov pred glavnim potresom. Zanimivo jih je primerjati predvsem z drugimi neseizmičnimi znanilci potresov. Študija jo pokazala, da je od vseh potresov z $M > 7,0$ med letoma 1950 in 1973 kar 44 odstotkov potresov imelo vsaj en predpotres z $M > 4,5$ v 40 dneh pred glavnim potresom. Druga študija je analizirala potrese z $M > 6,0$ med letoma 1977 in 1996 ter pokazala, da jih je 13,2 odstotka imelo en predpotres z $M > 5,0$ znotraj 10 dni in do 75 km daleč od glavnega potresa (Reasenberga, 1999). Domnevajo, da te ocene predpostavljajo spodnjo mejo in da ima več močnih potresov predpotrese, vendar ni na voljo statističnih podatkov za celotno Zemljo, predvsem zaradi neenakomernega opazovanja potresov. Večina predpotresov se zgodi znotraj istega časovnega intervala (30 dni) pred glavnim potresom kot drugi najpomembnejši znanilci potresov (anomalije radona, spremembe nivoja podtalnice, anomalije električnih in magnetnega polja), zato domnevajo, da obstaja fizikalna povezava med mehanizmi nastanka vseh teh pojavov.

Pojav predpotresov pojasnjujejo predvsem kot proces nastajanja »zametkov« glavnega potresa. Predpotresi nastajajo v neposredni bližini žarišča poznejšega glavnega potresa, njihova pogostost se povečuje s približevanjem trenutku glavnega potresa in navadno so veliko šibkejši od glavnega potresa. V nekaterih nizih predpotresov je opazno obdobje mirovanja tik pred glavnim potresom. Deformacije površja, opisane zgoraj, prav tako povezujejo s sprostitvijo dela seizmične energije. Glavno odprto vprašanje, na katero še ni zadovoljivega odgovora, je, zakaj nekatere močne potrese spremljajo predpotresi, drugih pa ne.

Sklepne misli

Primerjava različnih predhodnikov potresov omogoča analizo pogostih posplošenih trditvev glede njihovega pojavljanja.

1. Največje amplitude anomalij se pojavljajo pred potresi z največjimi magnitudami. To velja za emisije plinov in spremembe nivoja podtalnice, ni pa mogoče te trditve posplošiti na druge znanilce, čeprav opisani pojasnjevalni modeli predpostavljajo, da bi moralo biti tako.
2. Najmočnejše anomalije se pojavljajo znotraj enega meseca pred potresom, bližje je čas potresa, več je znanilcev potresa, ki se pojavljajo. Opazovane anomalije električnega in magnetnega polja ter predpotresi

v zadnjih urah pred potresom nakazujejo, da v teh nekaj urah potekajo v prelomni coni odločilni procesi za nastanek potresa.

3. Večina predhodnikov potresov se pojavlja v oddaljenosti, manjši kot 100 km od žarišča potresa, pri čemer je oddaljenost odvisna od magnitude potresa. To se sklada z odvisnostjo moči potresa od dolžine preloma, ki se ob potresu aktivira. Povprečna dolžina odseka preloma, ki se aktivira, je za potres z $M = 5$ enaka 5 km, za $M = 6$ enaka 15 km, za $M = 7$ enaka 40 km in za $M = 8$ enaka 100 km. Pojav anomalije tako nekoliko tudi prostorsko omejuje, kje se bo potres zgodil. Kljub temu pa za zdaj ni znano, na kako veliki površini lahko pride do anomalij električnega in magnetnega polja, anomalij koncentracije radona ali sprememb gladine podtalnice.

Kratkoročno napovedovanje potresov na podlagi opisanih predhodnikov potresov ni mogoče in verjetno še zelo dolgo ne bo mogoče. Za boljše razumevanje spremljevalnih pojavov potresov je treba izvajati čim bolj podrobne meritve na območjih z različnimi seizmotektonskimi značilnostmi in različno geološko zgradbo. Pomembno je, da se raziskave izvajajo na način, ki ustreza vsem merilom znanstvenega dela. Izogniti pa se je treba vsem podatkom, ki niso preverljivi ali ne omogočajo nadzora nad tem, kako so bili pridobljeni.

Viri in literatura

1. Cicerone, R. D., Ebel, J. E., Britton, J., 2009. A systematic compilation of earthquake precursors, *Tectonophysics*, 476, 371–396.
2. Fenoglio, M. A., Johnston, M. J. S., Byerlee, J. D., 1995. Magnetic and electric fields associated with changes in high pore pressure in fault zones: application to the Loma Prieta ULF emissions. *Journal of Geophysical Research*, 100, 12951–12958.
3. Fraser-Smith, A. C., Bernardi, A., McGill, P. R., Ladd, M. E., Helliwell, R. A., Villard Jr., O. G., 1990. Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake. *Geophysical Research Letters*, 17, 1465–1468.
4. Geller, R. J., 1997. Earthquake prediction: a critical review. *Geophysical Journal International*, 131, 425–450.
5. Ghos, D., Deb, A., Sengupta, R., 2009. Anomalous radon emission as precursor of earthquake. *Journal of Applied Geophysics*, 69/2, 67–116.
6. Johnston, M. J. S., 2002. Electromagnetic fields generated by earthquakes. V: Lee in sod.: *International Handbook of Earthquake & Engineering seismology*, 621–635, Academic Press.
7. Lapajne, J., 1990. Napovedovanje potresov – I. *Ujma*, 4, 67–71.
8. Lapajne, J., 1991. Napovedovanje potresov – II. *Ujma*, 5, 186–189.
9. Lapajne, J., 1992. Napovedovanje potresov – III. *Ujma*, 6, 220–222.
10. Lomnitz, C., 1994. *Fundamentals of earthquake prediction*. Wiley & Sons, 326 str.
11. Manga, M., Wang, C. Y., 2009. Earthquake hydrology. V: Kanamori, H.: *Earthquake Seismology*, 293–320. Elsevier.
12. Reasenber, P. A., 1999. Foreshock occurrence before large earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 104, 4755–4768.
13. Roeloffs, E. A., 1988. Hydrologic precursors to earthquakes: a review. *Pure and Applied Geophysics*, 126, 177–209.
14. Serebryakova, O. N., Bilichenko, S. V., Chmyrev, V. M., Parrot, M., Rauch, J. L., Lefeuvre, F., Pokhotelov, O. A., 1992. Electromagnetic ELF radiation from earthquake regions as observed from low-altitude satellites. *Geophysical Research Letters*, 19, 91–94.
15. Thomas, D., 1988. Geochemical precursors to seismic activity. *Pure and Applied Geophysics*, 126, 241–266.
16. Toutain, J. P., Baubron, J., 1999. Gas geochemistry and seismotectonics: a review. *Tectonophysics*, 304, 1–27.
17. Wakita, H., Nakamura, Y., Sano, Y., 1988. Short-term and intermediate-term geochemical precursors. *Pure and Applied Geophysics*, 126/2–4, 267–278.