

ŽARIŠČNI MEHANIZMI NEKATERIH MOČNEJŠIH POTRESOV V SLOVENIJI V LETIH 2006 IN 2007

FAULT PLANE SOLUTIONS OF SOME STRONGER EARTHQUAKES IN SLOVENIA IN 2006 AND 2007

Milka Ložar Stopar, Mladen Živčić

Povzetek

Za močnejše potrese, ki so nastali v Sloveniji v letih 2006 in 2007, smo iz seizmogramov odčitali smeri prvih premikov ob vstopu vzdolžnega (longitudinalnega) valovanja. Enajst potresov leta 2006 in dvanajst leta 2007 je bilo takšnih, da smo lahko zbrali zadostno število podatkov za zanesljivo opredelitev rešitve prelomne ploskve. Večina potresov je narivnega značaja s prelomno ploskvijo v smeri približno vzhod - zahod. Pri ostalih potresih je bil premik približno vodoraven ob skoraj navpičnem prelomu.

Abstract

From the seismograms of stronger earthquakes in Slovenia in 2006 and 2007 we read the first onsets of the arrivals of the longitudinal waves. For 23 of them there was enough data to determine the fault plane solutions. The mechanism is mostly of the thrust type with the fault plane striking approximately East – West. The remaining earthquakes were of the strike-slip type with the almost horizontal movement along the fault.

Uvod

Potres nastane ob prelomu v Zemljini notranjosti, ko pod vplivom tektonskih napetosti ena stran ob prelomu zdrsne relativno na drugo stran. Ozemlje Slovenije je prepleteno s številnimi prelomi (Poljak, 2007).

Povezavo med geološkimi strukturami, prelomi in potresi nam omogočajo žariščni mehanizmi. Ob potresu se potresno valovanje iz potresnega žarišča razširja v vseh smereh. Lastnosti tega valovanja v različnih smereh so drugačne in odvisne od usmerjenosti preloma in smeri premika ob njem. Mreže potresnih opazovalnic beležijo valovanje, ki se razširja iz potresnega žarišča. Iz teh podatkov seizmologi rutinsko določamo lokacijo nadžarišča, globino žarišča in magnitudo potresa (Cecić in sod., 2008). S skrbno analizo oblik vstopnega dela vzdolžnega in prečnega valovanja na posameznih potresnih opazovalnicah je ob zadostnem številu podatkov in njihovi ugodni legi glede na žarišče potresa možno ugotoviti smer prelomne ploskve in premika ob njej.

V tem prispevku je zajetih nekaj močnejših potresov v letu 2006 in 2007 z žariščem na ozemlju Slovenije in v neposredni okolici, za katere smo iz seizmogramov zbrali zadostno število podatkov za zanesljivo opredelitev rešitve prelomne ploskve in določitev žariščnih mehanizmov (preglednica 1).

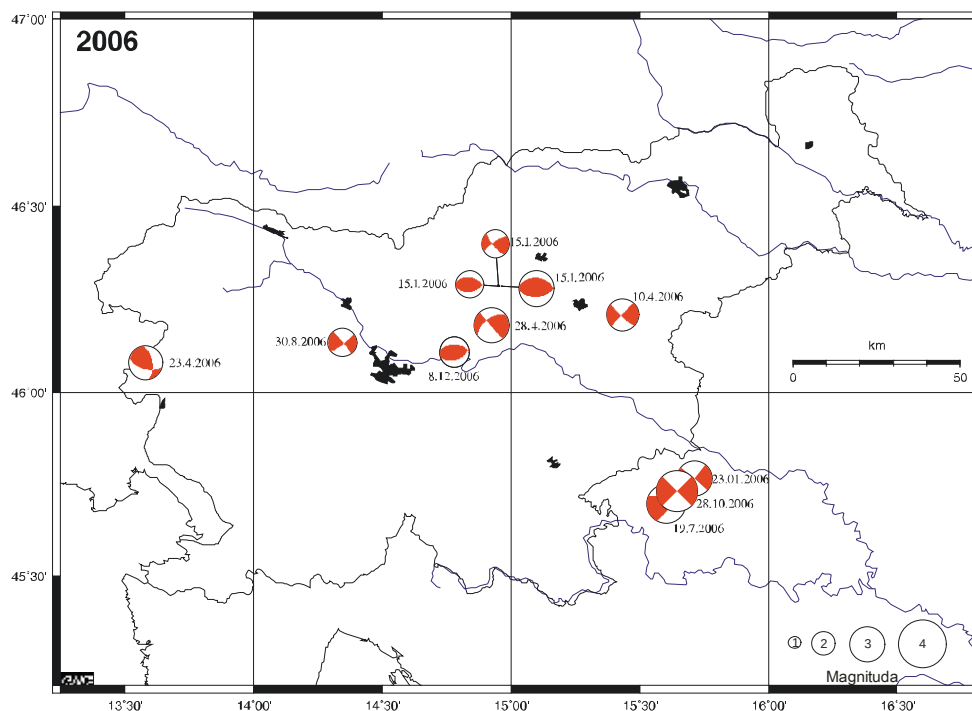
Postopek in podatki

Za rešitev prelomne ploskve smo uporabili smer nihanja tal ob prihodu longitudinalnega valovanja na potresno opazovalnico. To odčitamo na navpični komponenti kot kompresijo (zgostitev) ali dilatacijo (razredčitev) tal pod potresno opazovalnico. Ob poznavanju strukture Zemljine skorje in hitrosti potresnega valovanja v posameznih plasteh lahko izračunamo smer, v kateri je potresno valovanje zapustilo žariščno območje in opredelimo koordinate ter globino žarišča (Lienert in sod., 1988, 1994). V ta namen smo uporabili povprečni hitrostni model za ozemlje Slovenije, opredeljen iz tridimenzionalnega modela za prostorsko valovanje (Michellini in sod.,

datum	čas (UTC)	širina	dolžina	globina	MLV	ravnina 1			ravnina 2			P		T		Np	Nnp
date	time (UTC)	°N	°E	km	MLV	smer	naklon	premik	smer	naklon	premik	smer	naklon	smer	naklon	Np	Nnp
dd.mm	hh:mm	°N	°E	km	MLV	strike	dip	rake	strike	dip	rake	strike	dip	strike	dip	Np	Nnp
15. 1. 2006	2:34	46,29	14,95	4	2,3	81	46	76	281	46	104	181	0	272	80	16	1
15.1. 2006	2:41	46,29	14,96	16	3,0	86	50	84	275	40	97	180	5	316	83	20	0
15. 1. 2006	5:20	46,29	14,95	13	2,3	235	77	16	141	74	166	8	2	99	20	12	1
23. 1. 2006	21:29	45,773	15,711	12,4	3,0	40	90	0	310	90	180	354	0	85	0	16	0
10. 4. 2006	8:35	46,21	15,43	19	2,7	224	87	9	133	81	177	358	4	89	8	23	0
23. 4. 2006	16:21	46,08	13,58	19	2,8	105	57	40	350	57	140	48	0	318	50	18	0
28. 4. 2006	10:47	46,18	14,93	16	2,9	232	55	4	140	87	145	191	21	90	26	27	0
19. 7. 2006	2:34	45,70	15,61	13	3,3	30	73	18	295	73	162	162	0	252	25	27	0
30. 8. 2006	22:38	46,13	14,35	22	2,4	52	80	3	321	87	170	7	5	276	9	17	0
28. 10. 2006	13:55	45,73	15,65	16	3,5	45	90	0	315	90	180	360	0	90	0	28	1
8. 12. 2006	17:34	46,11	14,78	13	2,5	71	46	76	271	46	104	170	0	262	80	14	0
1. 1. 2007	14:59	46,50	14,22	16	3,8	26	28	43	257	71	111	330	23	196	58	20	0
13. 1. 2007	15:48	45,827	15,693	7,4	2,1	79	73	25	341	66	161	209	5	302	30	13	0
19. 2. 2007	20:37	46,21	15,45	17	1,9	230	71	36	127	56	157	355	9	93	39	12	0
11. 4. 2007	9:57	46,26	14,64	14	2,1	62	48	48	295	56	127	0	5	262	60	11	0
17. 4. 2007	8:05	45,814	15,246	6,3	2,1	120	35	90	300	55	90	30	10	210	80	10	0
19. 4. 2007	11:18	46,19	15,51	10	2,6	85	44	60	304	53	116	16	5	273	69	15	0
2. 5. 2007	12:49	46,50	14,45	16	3,4	90	45	83	280	45	97	5	0	272	85	29	0
4. 5. 2007	3:21	45,91	14,58	11	1,9	55	50	57	280	50	123	348	0	258	65	14	0
26. 9. 2007	19:47	45,889	15,596	3 fix	2,8	248	29	58	104	66	106	181	19	42	65	18	0
26. 9. 2007	20:38	45,877	15,597	7 fix	2,9	279	25	78	112	66	96	198	20	33	69	16	0
29. 9. 2007	1:24	45,922	15,389	9,6	3,1	233	33	62	85	61	107	163	15	30	69	28	0
18. 12. 2007	3:26	45,65	15,42	10	3,0	71	79	33	334	58	167	199	14	297	31	34	0

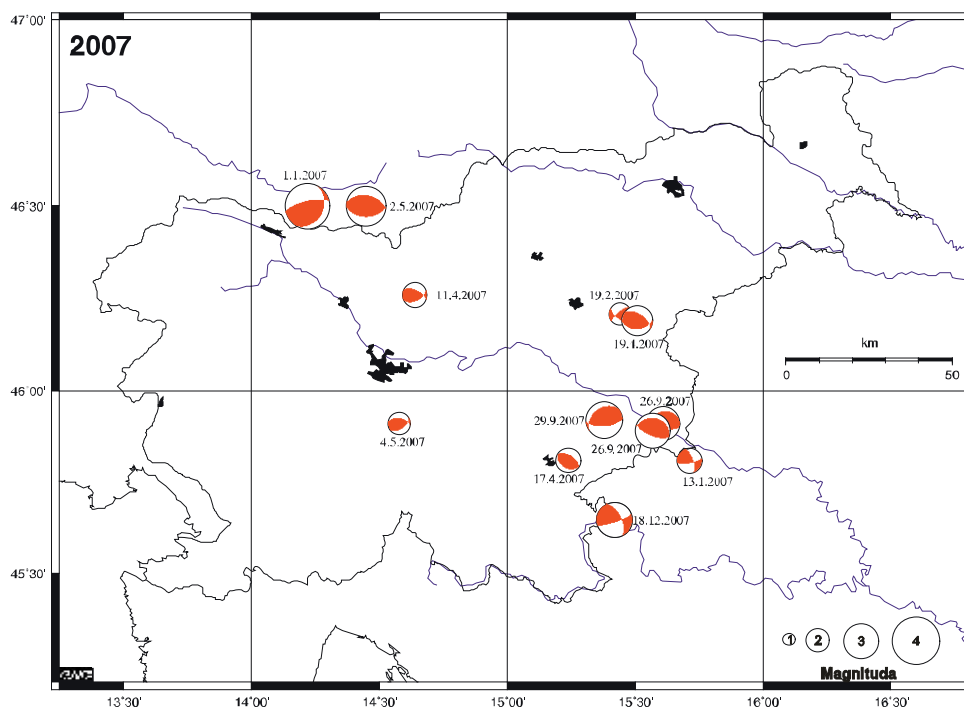
Preglednica 1. Močnejši potresi leta 2006 in 2007 z žariščem na ozemlju Slovenije in v neposredni okolici in njihovi parametri žariščnih mehanizmov. Smer je merjena od severa preko vzhoda, tako da je prelomna ploskev nagnjena v desno, naklon je merjen od horizontale in premik v prelomni ploskvi od smeri (Aki. in Richards, 2002). P je os največje in T os najmanjše napetosti. Np je število uporabljenih podatkov o smeri prvih premikov in Nnp število podatkov, ki niso v soglasju z rešitvijo.

Table 1. Stronger earthquakes in 2006 and 2007 with epicentres in Slovenia and the surroundings and fault plane parameters. Strike is measured from the North through East so that fault dips to the right of strike (Aki's convention), dip of the fault is measured from the horizontal and rake is measured in the fault plane from the strike. P is maximum and T minimum pressure axis. Np is number of stations used and Nnp is number of data inconsistent with the given solution.



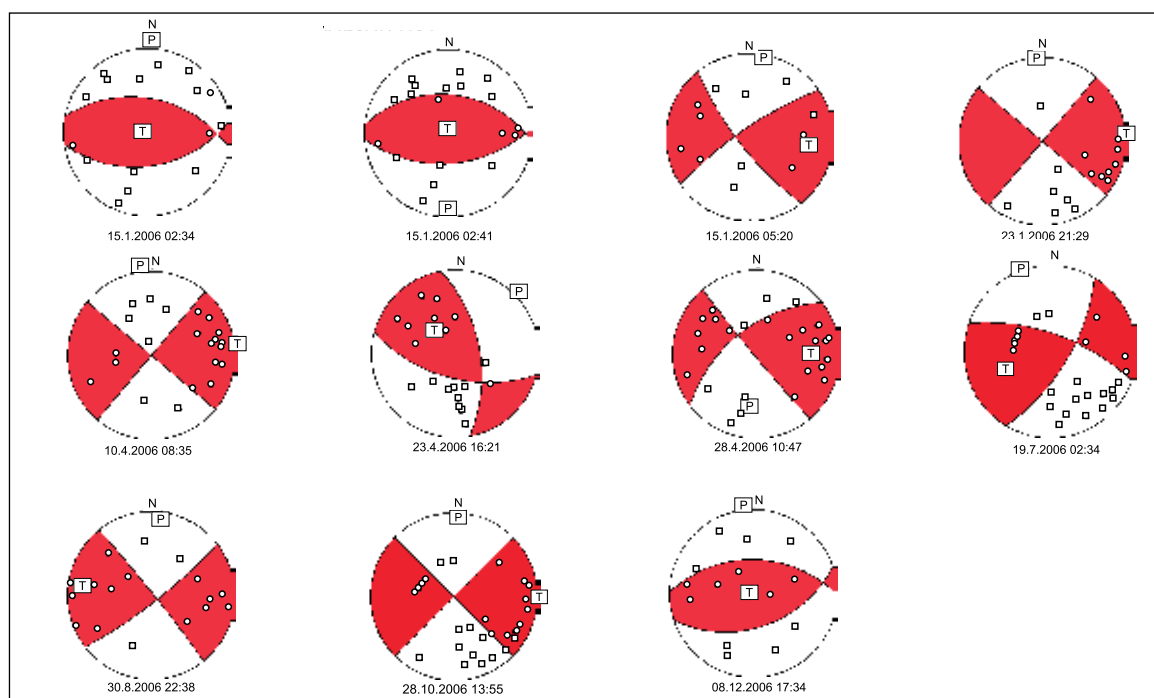
Slika 1. Lokacije močnejših potresov z njihovimi žariščnimi mehanizmi na ozemlju Slovenije in bližnje okolice v letu 2006. Rdeče obarvani kvadranti so kompresijski. Podan je tudi datum potresa.

Figure 1. Locations of the selected earthquakes with epicentres in Slovenia and the surroundings in 2006 and their fault plane solutions. Red quadrants are compressional. The date of the earthquake occurrence is also given.



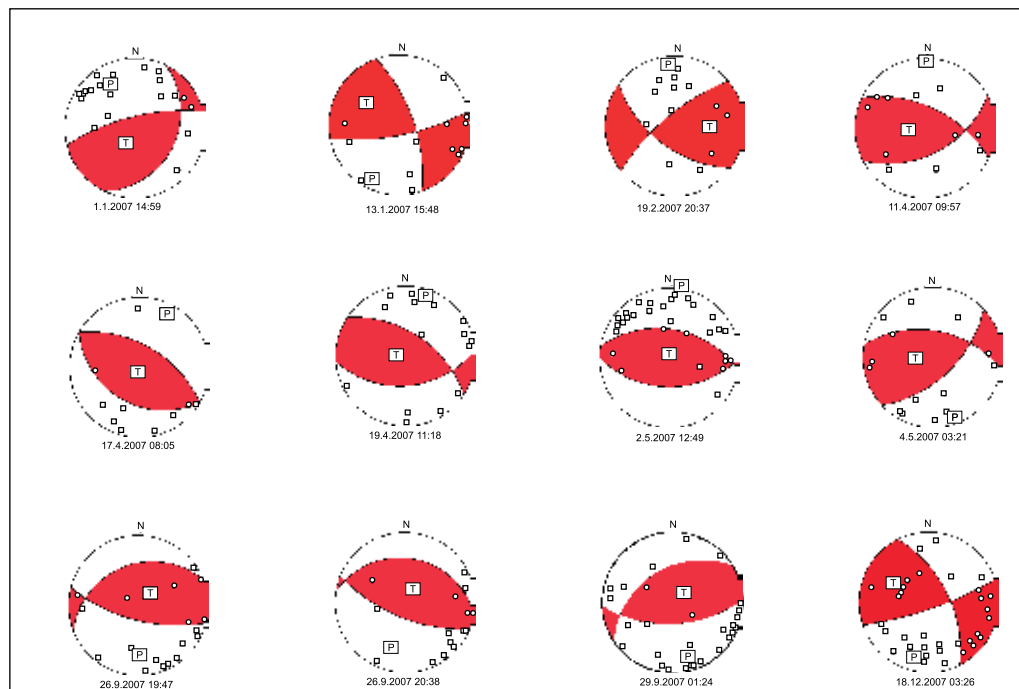
Slika 2. Lokacije močnejših potresov z njihovimi žariščnimi mehanizmi na ozemlju Slovenije in bližnje okolice v letu 2007. Rdeče obarvani kvadranti so kompresijski. Podan je tudi datum potresa.

Figure 2. Locations of the selected earthquakes with epicentres in Slovenia and the surroundings in 2007 and their fault plane solutions. Red quadrants are compressional. The date of the earthquake occurrence is also given.



Slika 3. Žariščni mehanizmi za enajst močnejših potresov na ozemlju Slovenije in bližnje okolice v letu 2006. Krogci predstavljajo opazovalnice, ki so kot prvi prihod zabeležile kompresijo, kvadratki pa opazovalnice, ki so zabeležile dilatacijo. Označeni sta smeri največje (P) in najmanjše (T) napetosti. Projekcija na spodnjo poloblo.

Figure 3. Fault plane solutions of the selected earthquakes in Slovenia and the surroundings in 2006. Circles denote stations with dilatations as the first onset and squares stations with compression, P and T are maximum and minimum stress axes. Lower hemisphere projection.



Slika 4. Žariščni mehanizmi za dvanajst močnejših potresov na ozemlju Slovenije in bližnje okolice v letu 2007. Krogci predstavljajo opazovalnice, ki so kot prvi prihod zabeležile kompresijo, s kvadratki so označene opazovalnice, ki so zabeležile dilatacijo. Osi napetosti sta označeni s črkama P in T. Projekcija na spodnjo poloblo.

Figure 4. Fault plane solutions of the selected earthquakes in Slovenia and the surroundings in 2007. Circles denote stations with dilatations as the first onset and squares stations with compression, P and T are maximum and minimum stress axes. Lower hemisphere projection.

1997) in modela za površinsko valovanje (Živčič in sod., 2000).

Dilatacije in kompresije izrišemo z različnimi simboli. V našem primeru dilatacijo predstavlja kvadrater in kompresijo krogec. Potem se določi dve medsebojno pravokotni ploskvi, ki ločita področja dilatacij in kompresij. Redkokdaj se zgodi, da so področja idealno ločena. Razlogi za to so lahko v nenatančnosti lokacije nadžarišča, žariščne globine ali nezadostnem poznavanju hitrostne strukture med žariščem in opazovalnico. Praviloma uporabljamo lateralno izotropen enodimenzionalen hitrostni model, čeprav se v naravi hitrosti spreminjajo tudi v vodoravni smeri in ni nujno, da žarek potuje po najkrajši poti, ker je ta lahko različna od najhitrejša poti. Prav tako ni nujno povsem pravilna predpostavka, da je proces v žarišču potresa bil čisti zmik. Nenazadnje obstaja tudi možnost, da je instrument na potresni opazovalnici postavljen z napačno polariteto. Zaradi tega je precej tvegana uporaba podatkov objavljenih v biltenih, ker jih ni mogoče preveriti. Za zanesljivo rešitev je nujno, da so na voljo celotni seizmogrami. Vse zapise potresov smo še enkrat skrbno pregledali in odčitali smeri prvih premikov P valovanja. K podatkom državne mreže potresnih opazovalnic Republike Slovenije smo dodali še dostopne podatke iz sosednjih držav, ki smo jih ravno tako odčitali sami.

Pri izračunu in določitvi prelomnih ploskev (Ložar in Živčič, 2007) smo si pomagali s programom Focmec (Snoke in sod., 1984), ki poda množico položajev vrzelnih ravnin, ki ustrezajo odčitanim prvim premikom. Kot končno rešitev smo se odločili za tisto, ki je imela najbolj vodoravno položeno os največje napetosti. Za to smo se odločili, ker je bilo v prejšnjih raziskavah ugotovljeno, da je os največje napetosti v področju Slovenije usmerjena približno vodoravno (Poljak in sod., 2000). Nekoliko bolj nagnjena je le v skrajnem vzhodnem delu.

Rešitve možnih prelomnih ploskev za enajst močnejših potresov v letu 2006 in dvanajst močnejših potresov iz leta 2007 so na sliki 3 in sliki 4. Podana je projekcija na spodnjo poloblo. Posamezne opazovalnice so predstavljene s simboli glede na smer prvega premika ob prihodu vzdolžnega valovanja. Kompresijski kvadranti so označeni z rdečo barvo, medtem ko so dilatacijski kvadranti brezbarvni. Označeni sta tudi smeri največje (P) in najmanjše (T) napetosti kot sta določeni iz rešitve prelomne ploskve. Geografska porazdelitev potresov za leto 2006 je razvidna iz slike 1 in za leto 2007 iz slike 2.

Zaključek

Poznavanje procesa v žarišču potresa poda neposredno informacijo o načinu in smeri deformacij v zemeljski skorji v žariščnem območju. Večina potresov nastane zaradi nenadnega strižnega zmika ob prelomu v zemeljski skorji. Povezava potresa s posameznim prelomom je nedvomen dokaz, da je ta prelom aktiven in to ima lahko velike posledice za izračun potresne nevarnosti določenega območja. Natančnost lokacij žarišča le redko zadošča, da bi lahko potres nedvomno pripisali nekemu prelomu. Opredelitev prelomne ploskve nam pomaga, ker v žariščnem območju lahko upoštevamo samo prelome določenega značaja in usmerjenosti. Večina potresov leta 2006 in 2007 z žarišči v Sloveniji, za katere smo opredelili rešitev prelomne ploskve je bilo naravnega značaja s prelomno ploskvijo v smeri približno vzhod - zahod. Pri ostalih potresih je bil premik približno vodoraven ob skoraj navpičnem prelomu.

Iz preglednice 1 je razvidno, da je bil najšibkejši potres, za katerega smo še lahko zbrali zadostno število zapisov, magnitude $MLV=1,9$. Najmanjše število uporabljenih podatkov o smeri prvih premikov je bilo dvanajst, medtem ko smo pri enem od potresov lahko uporabili kar 34 prvih premikov na posameznih opazovalnicah. To je bilo mogoče le zaradi nove mreže potresnih opazovalnic, ki je postopoma začela delovati med letoma 2002 in 2007 in uspešnega sodelovanja s seizmološkimi službami drugih držav.

Zahvala

Zapise potresov na opazovalnicah v Avstriji in v pokrajini Furlanija-Julijska krajina v Italiji smo pridobili v okviru Mednarodnega sporazuma o izmenjavi seizmoloških podatkov v »realnem času« na področju Alpe-Jadran. Pri nekaterih potresih ob meji smo uporabili tudi zapise Hrvaške seizmološke službe. Slike smo izdelali s programom GMT (Wessel in Smith, 1991, 1998).

Literatura

- Aki, K. in Richards, P. G., 2002. Quantitative Seismology, University Sausalito Books, Sausalito CA, 700 pp.
- Cecić, I., Čarman, M., Jesenko, T., Ložar Stopar, M. in Živčič, M., 2008. Potresi v Sloveniji leta 2007. V: Vidirh, R. Ed., Potresi v letu 2007, ARSO, ta številka.
- Lienert, B.R., Berg, E. in Frazer, L.N., 1988. HYPOCENTER: An earthquake location method using centered, scaled, and adaptively least squares. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 76, 771-783.
- Lienert, B.R., 1994. HYPOCENTER 3.2 - A Computer Program for Locating Earthquakes Locally, Regionally and Globally, Hawaii Institute of Geophysics & Planetology, Honolulu, 70 pp.
- Ložar Stopar, M. in Živčič, M., 2007. Žariščni mehanizmi nekaterih močnejših potresov v Sloveniji v letu 2005, Potresi v letu 2005, Agencija Republike Slovenije za okolje, 57-62, Ljubljana.
- Michelini, A., Živčič, M. in Suhadolc, P., 1997. Simultaneous inversion for velocity structure and hypocenters in Slovenia, *Journal of Seismology*, 2(3), 257-265.
- Poljak M., Živčič M., Zupančič P., 2000. The Seismotectonic Characteristics of Slovenia *Pure appl. Geophys.*, vol. 157, 37-55.
- Poljak M., 2007. Strukturno-tektonska karta Slovenije 1:250000, Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- Snoke, J.A., Munsey, J.W., Teague, A.G. in Bollinger, G.A., 1984. A Program for Focal Mechanism Determination by the Combined Use of Polarity and SV-P Amplitude Ratio Data, *Earthquake Notes*, 55, No. 3, p. 15.
- Wessel, P. in Smith, W.H.F., 1991. Free software helps map and display data, *Eos, Trans. Amer. Un.*, Vol. 72(441), pp. 445-446.
- Wessel, P. in Smith, W.H.F., 1998. New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, Vol. 79, p. 579.
- Živčič, M., Bondár, I. in Panza, G.F., 2000. Upper Crustal Velocity Structure in Slovenia from Rayleigh Wave Dispersion. *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 157, 131-146.