GEOLOGIJA *50/1*, 97–110, Ljubljana 2007
https://doi.org/10.5474/geologija.2007.008

Opazovanje vertikalne komponente recentnih premikov v Julijskih Alpah s PSInSAR metodo

Application of PSInSAR for observing the vertical component of the recent surface displacements in Julian Alps

Marko KOMAC & Miloš BAVEC
Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, Ljubljana, Slovenija
marko.komac@geo-zs.si, milos.bavec@geo-zs.si

Ključne besede: permanentni sipalci, aktivna tektonika, deformacije površja, PSInSAR, Julijske Alpe, Slovenija
Key words: permanent scatterers, active tectonics, surface deformation, PSInSAR, Julian Alps, Slovenia

Izvleček

Metoda interferometrije permanentnih sipalcev, s katero je bilo opazovano območje severozahodne Slovenije v obdobju med aprilom 1992 in decembrom 2000, se je izkazala za uporabno (vsaj) kot indikator vertikalne komponente relativnih hitrosti tektonskih premikov ter pri zaznavanju koseizmičnih premikov površja. Preliminarno smo ocenili tudi velikosti premikov (okrog 1mm/y) na območju raziskav, a so na tej stopnji raziskav rezultati sorazmerno nezanesljivi.

Abstract

Permanent Scatterer interferometry method has been used to observe subtle surface displacements in the north-western part of Slovenia between April 1992 and December 2000. The method proved to be very useful (at least) as indicator of the vertical component of relative tectonic displacements velocity and as the tool to detect co-seismic surface displacements. The preliminary displacements in the region (1mm/y about) have been estimated, yet at this stage they are to be taken with restrain.

Uvod

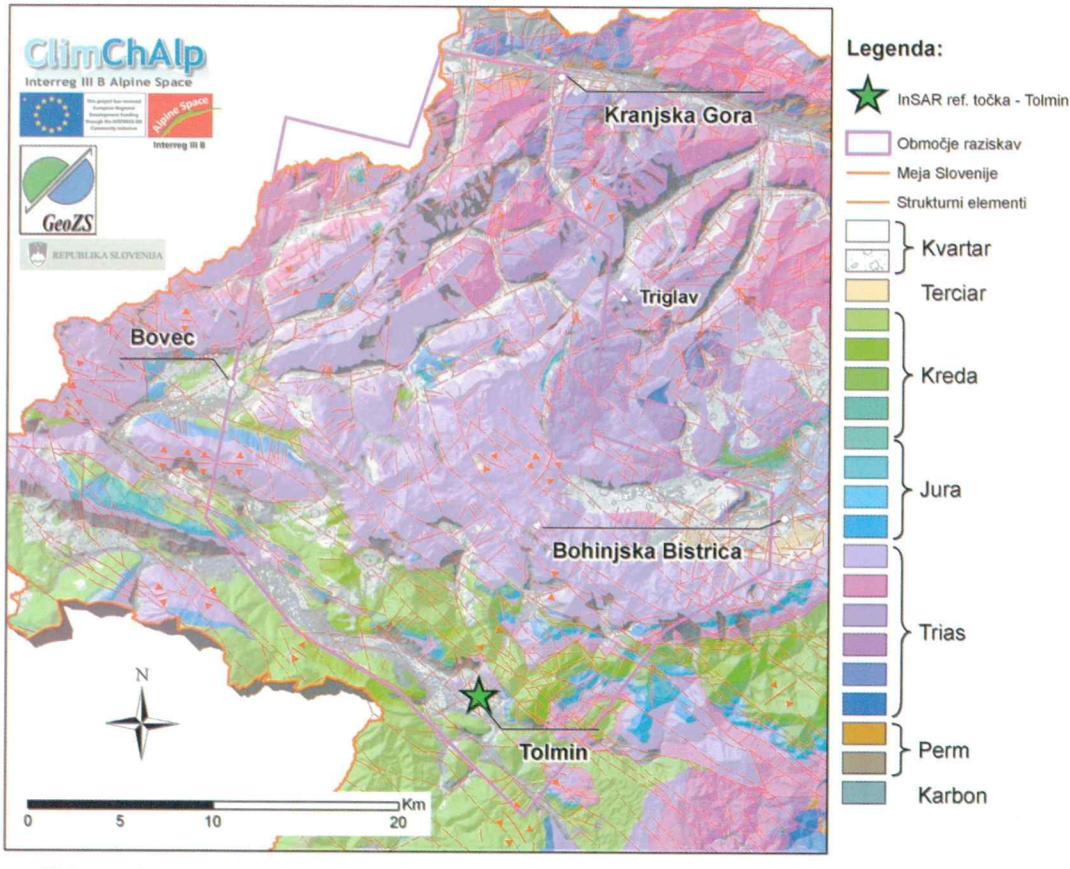
Moderna satelitska radarska metoda interferometrije permanentnih sipalcev (PSInSAR) omogoča zelo natančno opazovanje hitrosti vertikalne komponente premikov zemeljskega površja (Ferretti et al., 2001, 2005; Bürgmann et al., 2006; Dixon et al., 2006; Ferretti & Crespa, 2006). Metoda je zato uporabna tudi v geologiji za opazovanje koseizmičnih in aseizmičnih tektonskih premikov (Massonnet et al., 1993, 1994, 1996; Dixon, 1995; Peltzer et al., 1996, 1999), počasnih masnih premikov Ferretti et al; 2001; Hilley et al., 2004), posedanja ali nabrekanja tal (Carnec & Delacourt, 2000; Ferretti et al., 2000) ipd. Zaradi nekaterih tehničnih omejitev (npr. 35-dnevna ponovitev snemanja, valovna dolžina radarskega signala, licence analitičnih programskih orodij) je metodologija še v fazi aplikativnega razvoja in obseg njene uporabnosti še ni dokončno definiran. V okviru Interreg III B projekta z naslovom Climate Change, Impacts and Adaptation Strategies in the Alpine Space (ClimChAlp) smo na Geološkem zavodu Slovenije izvedli analizo premikov permanentnih sipalcev (PS) na

območju dela severozahodne Slovenije. Primarni namen raziskave je ugotoviti premike površja s stališča pojavljanja plazenj in obenem proučiti uporabnost podatkov InSAR in metode PSInSAR za druge geološko osnovane aplikacije, npr. za ugotavljanje z aktivno tektoniko povezanih površinskih deformacij. Pobočnim masnim premikom v tem prispevku ne posvečamo veliko prostora. Glavni poudarek je na aktivni tektoniki in dobro znani seizmični aktivnosti območja raziskav.

Poudarjamo, da so vsi opisani premiki PS relativni, saj so merjeni glede na referenčno točko v Tolminu. Ta je bila ocenjena kot relativno stabilna in sodeč po merskih podatkih sodi med najstabilnejše točke na območju raziskav, kar pa ne pomeni, da se sama ne premika. Opozoriti je treba tudi na razliko med premiki v smeri potovanja radarskega signala (odklon od navpičnice za 23°) in dejanskimi vertikalnimi komponentami premikov, ki predstavljajo projekcijo vektorja premika na navpičnico.

Območje raziskav, uporabljeni podatki, referenčna točka

Območje raziskav se nahaja v severozahodnem delu Slovenije in pokriva pre-



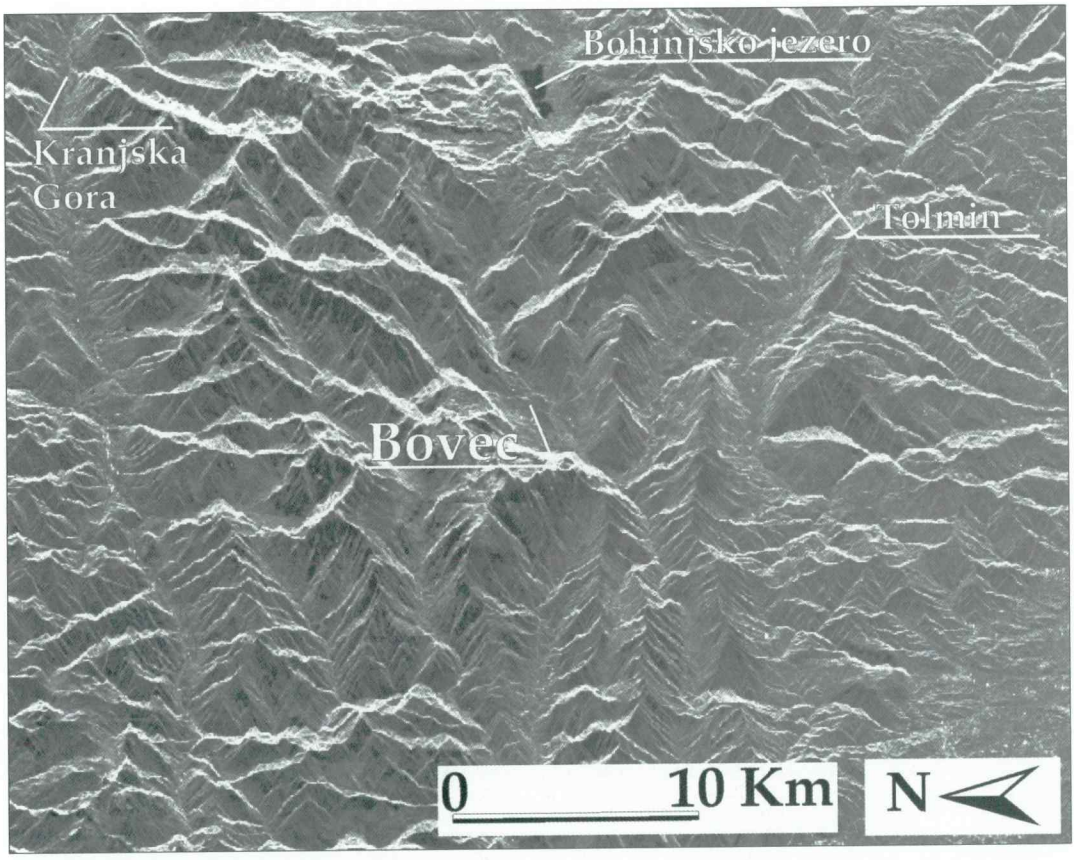
Slika 1. Območje raziskav se nahaja v severozahodnem delu Slovenije, na meji z Italijo in pokriva jugovzhodni del Alp, Julijske Alpe. Večino območja sestavljajo mezozojske karbonatne kamnine, mreža ledeniških in fluvialnih dolin s strmimi bregovi pa je zapolnjena s kvartarnimi sedimenti. Referenčna točka za podatke PSInSAR, ki je bila locirana v Tolminu, je označena z zeleno zvezdo. Geologija povzeta po Buserju (1987) in Jurkovšku (1987).

Fig. 1. The research area is located in the NW part of Slovenia, bordering the Italy and covering the south-eastern flank of Alps, Julian Alps. The area consists of Mesozoic carbonate rocks, the net of fluvial and glacial valleys is filled with Quaternary sediments. The reference point (a "zero" displacement point) was set in the town of Tolmin represented in the figure with the star. The research area is bordered with purple. The rest of the symbols in Fig. 1 are standard geological symbols. Geology after Buser (1987) and Jurkovšek (1987).

težno območje Julijskih Alp. Je nepravilne oblike in se razširja na preko 700 km^2, med Mostom na Soči (13°46´50´´E, 46°7´41´´N) na jugu, Kranjsko Goro (46°29´23´´, 13°47´7´´E) na severu, Srpenico (13°33´12´´E, 46°16´15´´N) na zahodu in Bohinjsko Bistrico (46°16´1´´N, 13°57´3´´E) na vzhodu (sl. 1).

Območje raziskav pokriva najvišje predele Slovenije s polovico Triglavskega narodnega parka. Povprečna nadmorska višina območja je 1157 metrov, najvišji vrh dosega 2664, najnižja točka pa je 141 metrov.

V okviru Interreg III B projekta Climate Change, Impacts and Adaptation Strategies in the Alpine Space (ClimChAlp) so bile na Geološkem zavodu Slovenije izvedene analize premikov PS na območju severozahodne Slovenije. Primarni namen raziskave je ugotoviti premike površja s stališča pojavljanja plazenj in obenem proučiti uporabnost podatkov InSAR in metode PSInSAR za druge geološke aplikacije. Za potrebe analiz je bilo uporabljenih 57 podob, pridobljenih v obdobju med 21. aprilom 1992 in 29. decembrom 2000. Za referenčno podobo je bila izbrana podoba, pridobljena na dan 26. 9. 1997 (sl. 2). Za referenčno točko, ki naj bi bila stabilna in naj bi stala na območju brez premikov ali z minimalnimi konstantnimi premiki, je bil izbran PS na triasnem dolomitu v Tolminu (46°11´3.44´´N, 13° 44´45.12´´E). Koherenca referenčne točke znaša 0,84. Na slikah 1 in 3 je predstavljena z zeleno zvezdo. Vsi premiki, opisani v tem prispevku, so relativni in vezani na to referenčno točko. Ker vemo, da na tem območju ni absolutno stabilnih točk (cf. Rižnar et al., 2007), je podatek o relativnosti klju-



Slika 2. Podoba amplitud SAR za referenčno podobo območja raziskav, posneta 26. septembra 1997. Efekt razpršenega šuma je opazen po vsej podobi in negativno vpliva na njeno uporabnost (Bianchi & Ferretti, 2006).

Fig. 2. Amplitude image for the Master image (September 26th 1997); the "speckle noise" effect can be seen across the whole image. Speckle impacts negatively on the quality and usefulness of SAR amplitude images (Bianchi & Ferretti, 2006).

čen. Negativne hitrosti namreč ne pomenijo (nujno) absolutnega spuščanja neke točke pač pa (morda) le njeno počasnejše dviganje glede na referenčno točko. Za dvigovanja je mogoče trditi, da so posledica aktivne tektonike, tista ekstremna so verjetno posledica lokalno omejenih razmer, medtem ko so vzroki gibanja navzdol bolj kompleksni zaradi sočasnega vpliva tektonike in gravitacije. Najverjetneje gre pri ekstremnih premikih navzdol za počasne gravitacijske masne premike – plazove.

Geološka skica

Obravnavano območje je sestavljeno v največji meri iz mezozojskih karbonatnih kamnin, nekaj je flišnih klastitov, na skrajnem severnem delu pa tudi nekaj paleozojskih klastičnih in karbonatnih kamnin (slika 1; povzeto po Buserju, 1987 in Jurkovšku, 1987). Območje leži (slika 3, 4) na širšem območju Južnoalpske narivne meje (nariva Južnih Alp na Zunanje Dinaride). Največji del spada k Julijskem pokrovu, na jugozahodnem delu pokriva del t.i. Tolminskega pokrova in se na skrajnem jugozahodnem robu dotakne tudi Trnovskega pokrova (po Placerju, 1998). Meje posameznih pokrovnih enot so na nekaterih mestih zelo jasne, drugod pa nekoliko bolj interpretativne (cf. Buser, 1987; Jurkovšek, 1987). Slednje velja predvsem za narivnico Julijskega pokrova na območju Bovca in Polovnika ter za Južnoalpsko narivno mejo. Razen omenjenih struktur sta za razumevanje dogajanja na tem območju pomembna še Idrijski in Savski prelom ter Ravenski prelom kot nosilec najmlajše seizmične aktivnosti. Za vse naštete prelome predvidevamo, da pri njih prevladuje desnozmična komponenta premikanja. Za Ravenskega je bilo to dokazano ob potresu leta1998 (Zupančič et al., 2001; Bajc et al., 2001).

Dokazana aktivna tektonika na območju raziskav je posledica kompresijskega napetostnega polja s približno smerjo σ_1 S–J (npr. Placer, 1998; Grenerczy et. al., 2005; Weber et al., 2006; Rižnar et al., 2007). Povzemamo, da so Idrijski, Savski in Ravenski prelom aktivni ter da je vsaj na opisovanem območju aktivna tudi Južnoalpska narivna meja. Pokrov Julijskih Alp kot tak zaradi svoje geometrije ne more imeti aktivne narivnice, vse pa kaže, da se ta vsaj na zahodnem robu ujema z eno od aktivnih struktur, domnevno povezano z Južnoalpsko narivno mejo. Širše območje zaznamuje srednja stopnja seizmične aktivnosti (Poljak et al., 2000). V obdobju snemanja, ki je potekalo od aprila 1992 do decembra 2000, se je na območju raziskav v pogorju Krna zgodil močan potres z magnitudo MW = 5,6 (Gosar et al., 2001; Zupančič et al., 2001; Bajc et al., 2001; Vidrih, 2006). V tem prispevku se dotikamo tudi možnosti zaznavanja koseizmičnih površinskih premikov tega in podobnih potresov s PSInSAR.

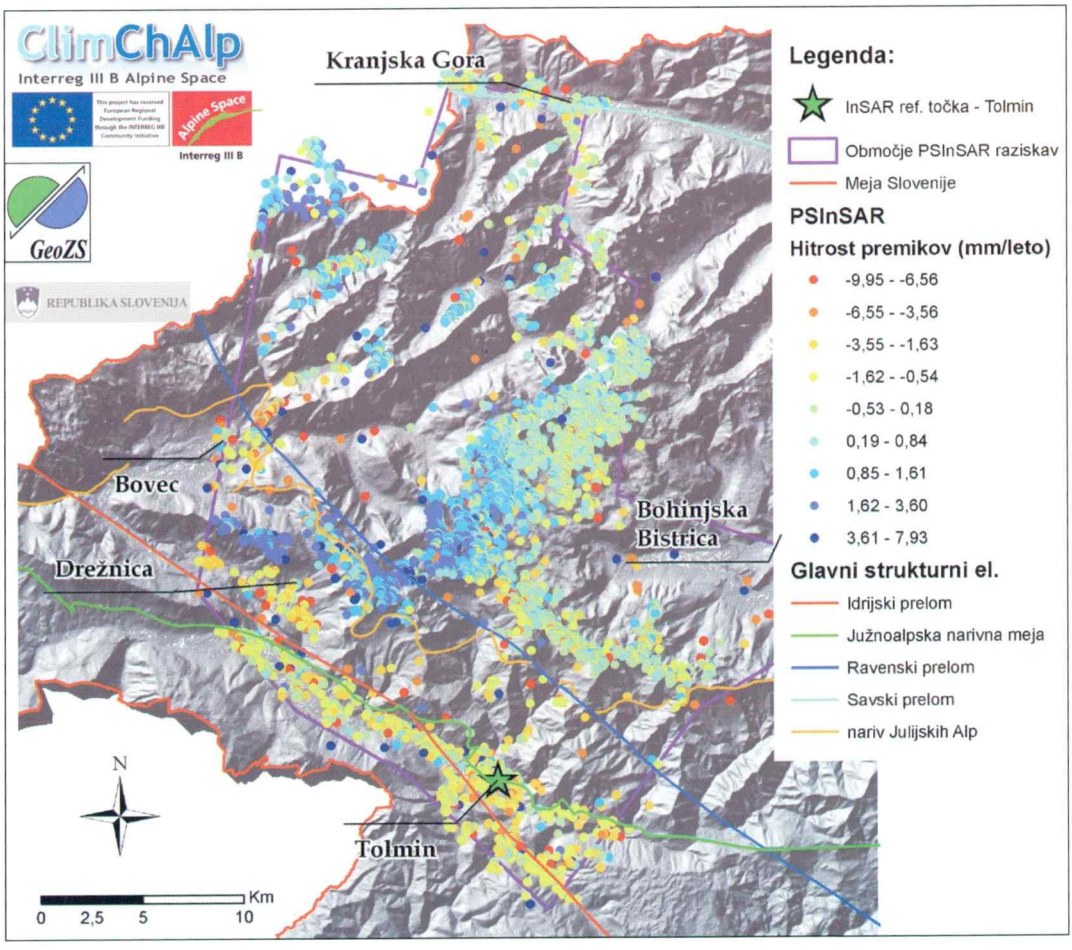
Interferometrija permanentnih sipalcev

Umetno odprtinski radar ali SAR (*ang. Synthetic Aperture Radar*) je sistem senzorjev, nameščen na opazovalni osnovi, satelitu ali letalu, ki proti površju oddaja več zaporednih mikrovalovnih signalov z razponom valovne dolžine med 1 in 10 GHz. Sprejemnik oziroma kratka radarska antena, montirana na isti osnovi, zazna odboje emitiranih signalov od objektov na zemeljskem površju. Sistem deluje po principu Dopplerjevega efekta in tako navidezno poveča dolžino antene. Umetna odprtina predstavlja razdaljo v smeri leta, med trenutkom oddajanja signala in trenutkom, v katerem radar zaznava s površja odbiti signal (Oštir, 2006).

Opazovanje sprememb površja z metodo SAR skozi daljše časovno obdobje temelji na zaznavanju sprememb med posnetki, kar pa je zaradi časovne in geometrične dekorelacije posnetkov ter atmosferskih vplivov zelo oteženo (Ferretti & Crespa, 2006). Metoda detekcije permanentnih sipalcev (ang. Permanent Scatter Thecnique – PSInSAR), ki so jo razvili v »spin-off« podjetju Tele-Rilevamento Europa, omogoča detekcijo točk na površju Zemlje s stalnim odbojem, kljub nekoliko drugačnemu ali zamaknjenemu opazovanju z opazovalne osnove (Ferretti & Crespa, 2006). S tako metodo, ki temelji na zapletenem algoritmu, je pričakovati najboljše rezultate v poseljenih območji in območjih golih skal. Objekti in izdanki kamnin so zaradi koncentriranega odboja emitiranih signalov nazaj proti senzorju najprimernejši in najzanesljivejši permanentni sipalci (PS). Metodologija je zaradi valovne dolžine emitiranega signala uporabna le za premike, ki so v smeri potovanja signala, manjši od 28 mm v času med dvema snemanjema. Slednje se običajno po-

novi vsakih 35 dni. Premiki se določijo glede na referenčno točko znotraj opazovanega območja, za katero se oceni, da ni podvržena večjim premikom, tako da dejansko opazujemo relativne premike. Metoda je natančneje opisana v Oštir & Komac (2007). Sistem satelitov ERS, ki so vir podatkov za predstavljeno študijo, v letu 1994 in delno v letu 1995 ni deloval, zato v tem obdobju ni zabeleženih podatkov o premikih (Bianchi & Ferretti, 2006).

Metoda je uporabna za zaznavanje vertikalne komponente sprememb na površini. Zaznavanje relativnih sprememb višine površja je zanimivo na številnih področjih (Ferretti & Crespa, 2006). Tako so lahko posedki kazatelj na pogrezanje območja zaradi rudarjenja, črpanja podtalnice ali nafte iz rezervoarjev (Vasco & Ferretti, 2005), mikro-tektonskih premikov, plazenj (Colesanti et al., 2003a; Hilley et al., 2004), posedkov zaradi konsolidacije terena po izvedbi gradbenih posegov, posedanja in nabrekanja tal zaradi sezonskih vplivov (Colesanti et al., 2003b).

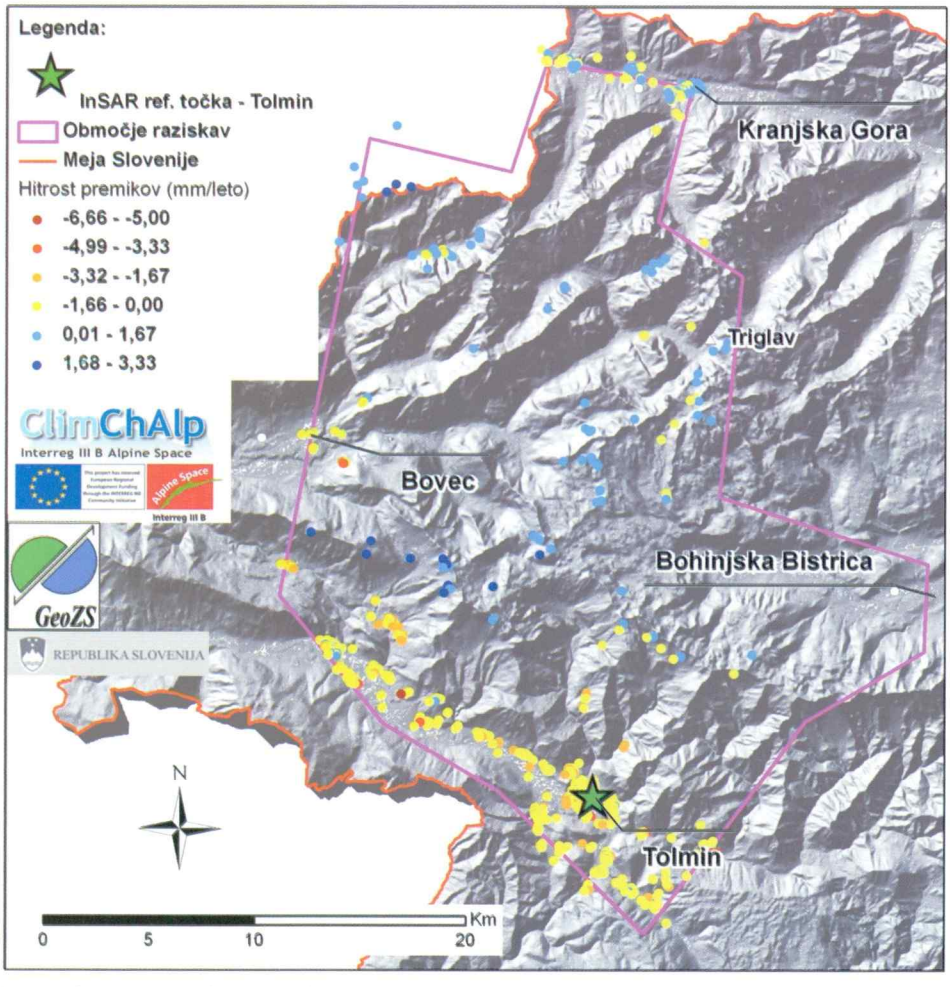


Slika 3. Lokacije 16304-ih PS na območju raziskav, prikazane v razredih intenzitete premikov. Topli toni predstavljajo negativne premike, torej relativno spuščanje in hladni toni pozitivne premike, torej relativno dviganje v odvisnosti od nivoja referenčne točke (Tolmin – označen z zeleno zvezdo). Hitrosti premikov so podane za smer potovanja signala.

Fig. 3. The 16304 PS, located in the research area, are represented with displacement velocity classes (mm/year). Warm tones represent relative »downward« displacements and cold tones represent relative "upward" displacements in relation to reference point, marked with green star. The displacement velocities are given for the line-of-sight direction. Important structural elements (faults and thrusts) are also shown.

Rezultati raziskav in diskusija

Območje raziskav je z vidika interferometrije permanentnih sipalcev problematično zaradi pokritosti z vegetacijo in zaradi globokih dolin, saj zaradi njih pri opazovanju površja pod kotom 23°, kot je to primer pri SAR pridobivanju podatkov, nastanejo t.i. sence. Kljub tema dvema omejitvama je povprečna gostota PS na opazovanem območju 23/km^2, minimalna zahtevana gostota za izvedbo analiz pa je 15 točk na kvadratni kilometer (Bianchi & Ferretti, 2006). Povprečni letni premiki so bili izračunani za 16304 PS, katerih koherenca je bila večja od 0,5 (sl. 3). Za dobrih 10 % PS (1646 točk; sl. 4) z najmanjšimi variacijami v kakovosti podatkov (z največjimi koherencami) so bili pridobljeni podatki iz vseh 57-ih snemanj, kar je omogočilo njihovo časovno analizo. Za teh 1646 točk so bili izdelani časovni nizi premikov za obdobje od leta 1992 do 2000, s katerimi je možno natančneje opazovati premike površja in jih primerjati z drugimi



Slika 4. Lokacije 1646-ih PS na območju raziskav, za katere so bili izračunani časovni premiki. Le-ti so prikazani v razredih intenzitete premikov. Topli toni predstavljajo negativne premike, torej gibanje navzdol in hladni toni pozitivne premike, torej dviganje, oboji relativno glede na referenčno točko (Tolmin – označen z zeleno zvezdo). Hitrosti premikov so podane za smer potovanja signala.

Fig. 4. The 1646 PS with temporal displacement measurements, located in the research area, are represented with displacement velocity classes (mm/year). Warm tones represent relative "downward" displacements and cold tones represent relative "upward" displacements in relation to reference point, marked with green star. The displacement velocities are given for the line-of-sight direction. Important structural elements (faults and thrusts) are also shown.

prostorsko-časovnimi dejavniki. Ker so bili interferometrični podatki pridobljeni le iz spuščajočih tirnic satelita (*ang. descending orbit*), se PS na območju raziskav nahajajo le na ravninah in na osojnih pobočjih. Metoda ima kar nekaj šibkih točk in možnih sistemskih napak. Zelo problematično je na primer merjenje PS na pobočjih, saj lahko ob horizontalnih premikih (glede na seizmološke podatke naj bi slednji prevladovali) na strmih pobočjih dobimo zelo velike navidezne vertikalne premike. V konkretnem primeru prevladujočega desnega zmikanja in spuščajoče se tirnice satelita pričakujemo navidezno dvigovanje na severnih in spuščanje na južnih pobočjih.

Upoštevaje celotno populacijo PS (n = 16304), dosegajo največje relativne hitrosti premikanja PS proti satelitu 7,96 mm/leto, največje relativne hitrosti oddaljevanja od satelita pa (–)9,96 mm/leto. Vrednosti so podane za smer potovanja radarskega signala, torej z naklonom 23° od navpičnice. V vertikalni smeri so največje relativne hitrosti gibanja navzgor 7,32 mm/leto, navzdol pa (–)9,17 mm/leto.

Lastnosti izbranih 1646-ih točk (PS) z največjim zaupanjem v kakovost podatkov so nekoliko drugačne od lastnosti celotne populacije PS. Največje relativne hitrosti premikanja PS proti satelitu v smeri potovanja signala presegajo 6,65 mm/leto, največje relativne hitrosti oddaljevanja od satelita v smeri potovanja radarskega signala pa presegajo (–)3,30 mm/leto. V vertikalni smeri so največje relativne hitrosti gibanja navzgor do 6,12 mm/leto, navzdol pa do (–)3,06 mm/leto.

»Dviganje« Alp

Relativno dviganje Južnih Alp (natančneje: navzgor usmerjena vertikalna komponenta vektorja premikanja) glede na njihovo predgorje ni novost in je bilo tudi na ozemlju Slovenije že delno kvantificirano (npr. Rižnar et al., 2005, 2007). Novost so izjemno visoke vrednosti tu predstavljenih meritev, ki pa jih moramo interpretirati skrajno previdno. Razlogov za mogočo napačno interpretacijo je več; od sistemskih merskih napak, napak v algoritmu, ki je bil izdelan predvsem za opisovanje vertikalnih premikov ne pa vertikalne komponente premikov, nadalje zgoraj opisanih navideznih vertikalnih premikov na pobočjih, do dejstva, da največji del točk, ki potujejo »navzdol«, leži na sorazmerno mehkih kvartarnih sedimentih. Zato se v tem prispevku omejujemo predvsem na predstavitev rezultatov meritev in njihovo statistično obdelavo, možnost njihove interpretacije pa podajamo s pridržkom.

Že na prvi pogled rezultati kažejo (sliki 3 in 4) na opazno razliko med smerjo premikov skupine PS v Soški dolini, med Tolminom in Kobaridom, ter na drugi strani skupino PS v Julijskih Alpah. Očitno je, da se slednje dvigajo v primerjavi s Tolminom, kjer je locirana referenčna točka. Takšno opazovanje je skladno s predpostavko o aktivnosti na območju Nariva Julijskih Alp, ki je nakazana tudi v prispevku Rižnarja in sodelavcev (2007). Bega pa dejstvo, da ne opazimo nobenih znakov aktivnosti Južnoalpske narivne meje oziroma da je vzdolž te, sicer ne najnatančneje določene meje, signal PS ponekod celo nasproten od pričakovanega. Problem bomo poskušali rešiti s kategorizacijo posameznih PS-jev. Permanentni sipalci na območju Julijskih Alp, ki kažejo na posedanje ali pogrezanje so po vsej verjetnosti posledica počasnih pobočnih masnih premikanj, najverjetneje konsolidacije materiala v pobočnih gruščih. Preglednica 1 podaja različne vrednosti hitrosti povprečnih vertikalnih premikov permanentnih sipalcev na območju Julijskih Alp, katerih koherenca je večja od 0,74. Pri ocenah vertikalnih dvigov je bil upoštevan kriterij povprečne hitrosti dviganja posameznega PS. Ob upoštevanju vseh dvigajočih se PS (n = 91), kar je zelo konzervativen pristop, kaže izračunana povprečna hitrost na dviganje za slab milimeter na leto. Ob manj konzervativnem pristopu, kjer so upoštevani le najbolj izstopajoči PS (n = 5), katerih dviganje je večje od 2,43 mm/leto (zgornja 2,5 % populacije), ocenjujemo, da znaša vertikalna komponenta premikanja na območju Julijskega pokrova glede na območje Tolminskega povprečno 3,35 mm/leto. Tako izračunana hitrost je nepričakovano visoka, zato ne smemo izključiti možnosti sistemske napake. V prihodnosti bomo poskusili s terensko kategorizacijo PS odpraviti nekatere od možnih napak.

Koseizmični premiki površja

Slika 5 prikazuje časovna niza dvigovanja Julijskih Alp ob upoštevanju vseh dvigajočih se PS v Julijskih Alpah (n = 91) in PS, katerih povprečno vertikalno dviganje

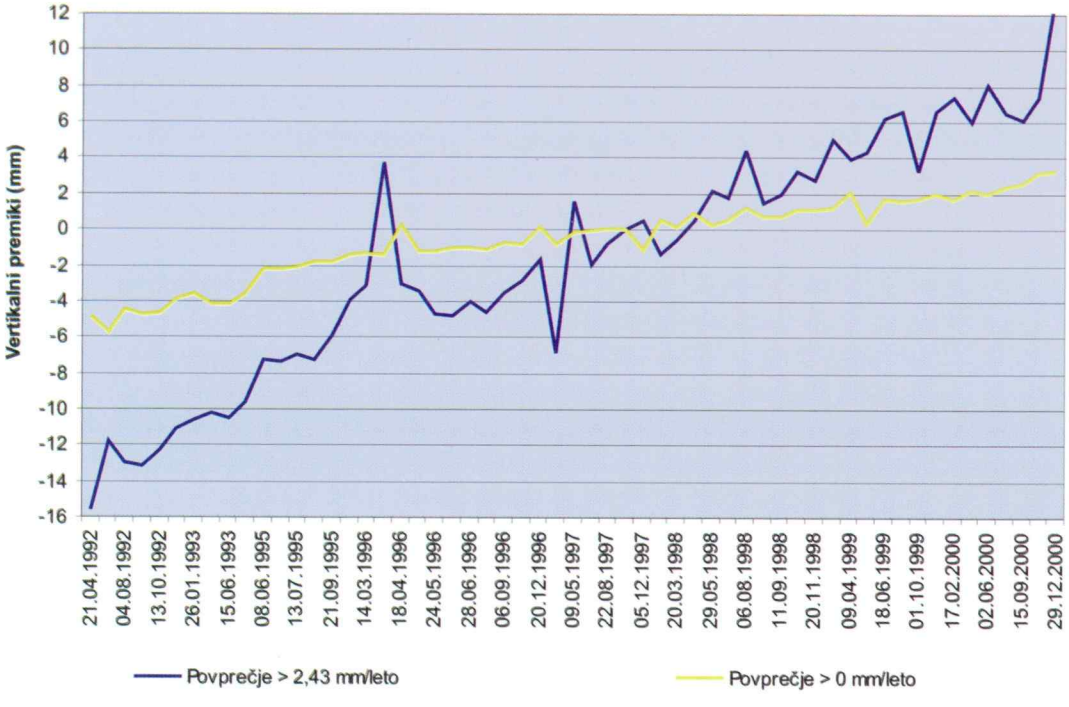
Preglednica 1. Povprečne relativne hitrosti vertikalnih komponent premikov permanentnih sipalcev na območju Julijskega pokrova za PS-e s časovnimi nizi premikov. Hitrosti premikov so bile izračunane na podlagi razlike med končnim ($h_{konč}$) in začetnim ($h_{zač}$) nivojem PS glede na referenčno točko. Čas opazovanja je bil pri vseh enak in je znašal 3174 dni. Zadnji stolpec podaja povprečje za vse relativno dvigajoče se PS-e, ki ležijo na območju Julijskega pokrova (n = 7260).

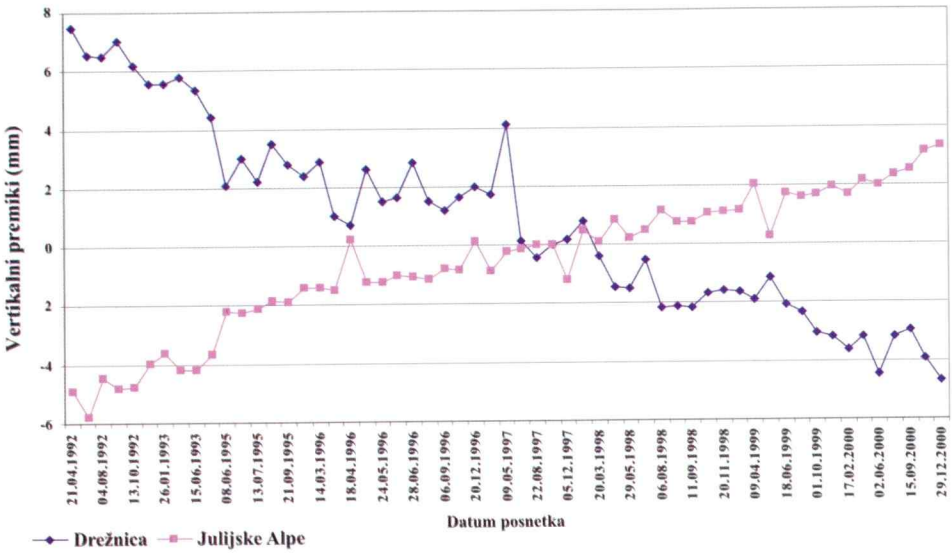
Table 1. Average relative vertical displacement velocities of PS with temporal measurements, situated in the area of the Julian nappe. Velocities were estimated based on difference between the relative elevations at the end and at the beginning of the observations in comparison to reference point (column "Razlika"). Daily velocities are estimated in column "Dvig (mm/dan)" and yearly velocities in column "Dvig (mm/leto)". The time of observation was 3174 days. In the first row, the estimated velocities are referred to the group of most extreme uplifting PS, and in the second row velocities are referred to all "uplifting" PS situated in the Julian nappe area. In the last column, the average relative vertical displacement velocities of all PS situated in the area of the Julian nappe that are being uplifted in relation to reference point (n = 7260).

Permanentni sipalci (PS), kjer so	**Razlika ($h_{konč} - h_{zač}$) (mm)**	**Dvig (mm/dan)**	**Dvig (mm/leto)**	**Povprečje vseh PS na območju Julijskega pokrova (mm/leto)**
– premiki > 2,43 mm/leto (n = 5)	29,16	0,0092	3,35	3,53 (n = 244)
– premiki > 0,0 mm/leto (n = 91)	8,21	0,0026	0,94	0,95 (n = 7260)

je večje od 2,43 mm/leto (n = 5). Ob nedvoumnem aseizmičnem premikanju lahko med decembrom 1996 in junijem 1997 opazujemo tudi nekatere izrazitejše dogodke, ki bi jih lahko pripisali potresom (15. 2. 1997 ML = 2,3; 25. 4. 1997 ML = 2,3; 10. 5. 1997 ML = 2), vzrok za bolj intenzivne premike v marcu in aprilu 1996 nam ni znan, najverjetneje pa je povezan s sistematično napako. Lahko pa bi bil povezan tudi s kopičenjem energije pred potresom 13. 4. (ML = 4) in popotresom 16. 4. 1996 v Furlaniji (Živčić, 2006).

Slika 6 prikazuje primerjavo povprečnega vertikalnega relativnega »spuščanja« PS v vasi Drežnica (n = 58) in povprečnega relativnega vertikalnega dviganja PS na območju Julijskega pokrova (n = 91), ki je





Slika 6. Primerjava povprečnih relativnih vertikalnih premikov za območje vasi Drežnica, kjer se nahaja 58 PS (modra linija) s povprečnimi relativnimi vertikalnimi premiki vseh 91-ih PS na območju Julijskega pokrova, ki se dvigajo (ocenjena povprečna hitrost dviganja nad 0,0 mm/leto). Premiki PS so podani v mm. Vse vrednosti so projicirane na navpičnico in predstavljajo vertikalne komponente relativnih premikov.

Fig. 6. Comparison of average relative vertical component displacements of 58 PS in the Drežnica village and average relative vertical component displacements of all uplifting PS situated in the Julian nappe (n = 91; PS with average displacement velocity above 0.0 mm/year), shown in blue and red respectively. All displacements are given in mm and are projected to the vertical axis.

prikazan tudi na sliki 5. Vas Drežnica se »spušča« s povprečno hitrostjo 1,4 mm/leto glede na referenčno točko. V vasi Drežnica se v obdobju med 28. 2. in 9. 5. 1997 pojavi nenaden dvig celotnega območja za dobra 2,4 mm, kateremu sledi posedek, skoraj dvakratne velikosti (3,98 mm). Podobno gibanje je opazno pri povprečju hitrosti PS za območje Alp s hitrostmi nad 2,43 mm/leto (sl. 5), le da je smer gibanja nasprotna. Analiza podatkov o potresih v obdobju med oktobrom 1996 in oktobrom 1997 pokaže, da sta se med 29. 11. 1996 (ML = 1,6) in 15. 2. 1997 (ML = 2,3) na ožjem območju vasi Drežnica, v oddaljenosti največ 7 km (Živčić, 2006), zgodila dva potresa, ki sta očitno (z zamikom) botrovala dogajanju na območju Drežnice. Primerjava podatkov je zanimiva zaradi nasprotne usmeritve trenda relativnega gibanja, ki nedvomno dokazuje pripadnost dveh območij dvema, med seboj povezanima tektonskima domenama.

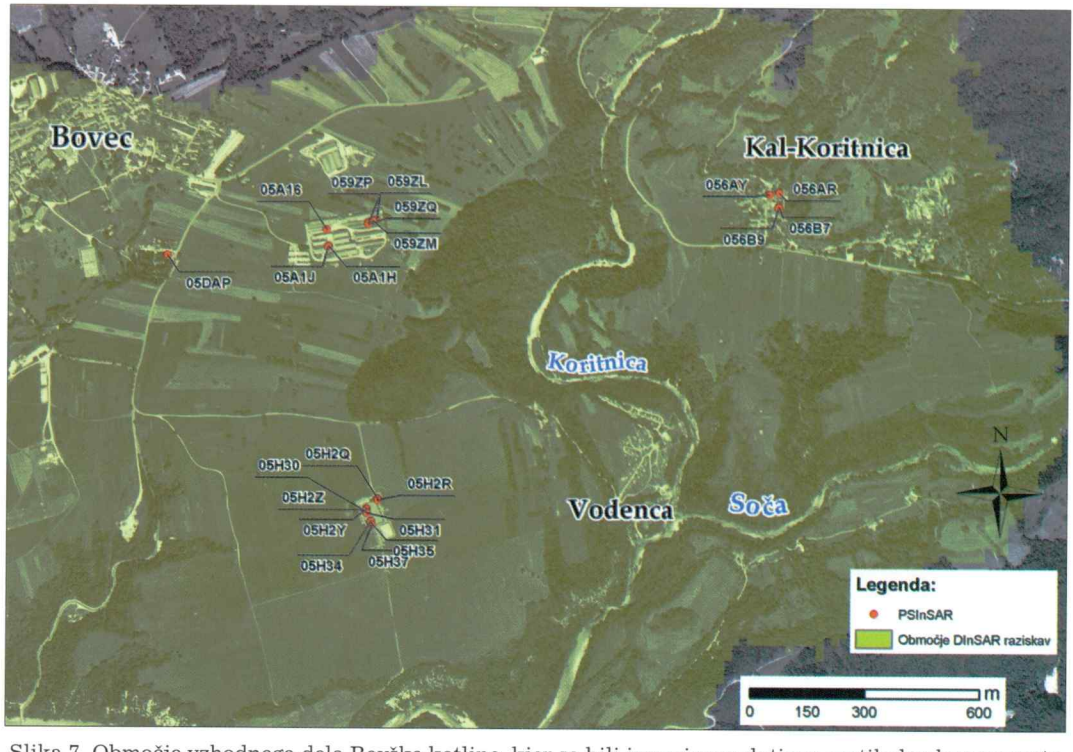
Slika 5. Grafični prikaz povprečnih premikov glede na referenčno točko v Tolminu, iz katerih ocenjujemo vertikalno komponento hitrosti premikanja PS na območju Julijskega pokrova glede PS na Tolminskem pokrovu. Prikazani so vertikalni premiki za skupine PS kot so razdeljeni v Preglednici 1. Trend dviganja, označen z rumeno barvo, predstavlja povprečje relativnih vertikalnih komponent premikov vseh 91-ih PS na območju Julijskega pokrova, ki se dvigajo (ocenjena povprečna hitrost dviganja nad 0,0 mm/leto) glede na referenčno točko. Trend dviganja, označen z modro barvo, predstavlja povprečje relativnih vertikalnih komponent premikov 5-ih PS na območju Julijskega pokrova z največjimi relativnimi hitrostmi dviganja (zgornja 2,5 % populacije z ocenjeno povprečno hitrostjo dviganja nad 2,43 mm/leto) glede na referenčno točko. Premiki PS so podani v mm. Vse vrednosti so projicirane na navpičnico in predstavljajo vertikalne komponente relativnih premikov.

Fig. 5. Displacement trends of PS within the Julian nappe according to the reference point. The trend indicated in yellow represents the average relative vertical component displacements of all uplifting PS situated in the Julian nappe (n = 91; PS with average displacement velocity above 0.0 mm/year), and the trend indicated in blue represents the average relative vertical component displacements of the group of most extreme uplifting PS, situated in the Julian nappe (n = 5 PS with average relative displacement velocity above 2.43 mm/year) according to the reference point. All displacements are given in mm and

V obdobju med 15. 3. in 18. 4. 1996 so vidni sočasni relativni spusti PS na območju Drežnice in relativni dvigi PS na območju Julijskega pokrova. Zrcalna slika pojava se ponovi v obdobju med 9. 4. in 14. 5. 1999, tokrat je relativni dvig opazen na območju Drežnice in relativni spust na območju Julijskega pokrova. Glede na seizmološke podatke (Živčić, 2006) menimo, da so to lahko koseizmični premiki površja.

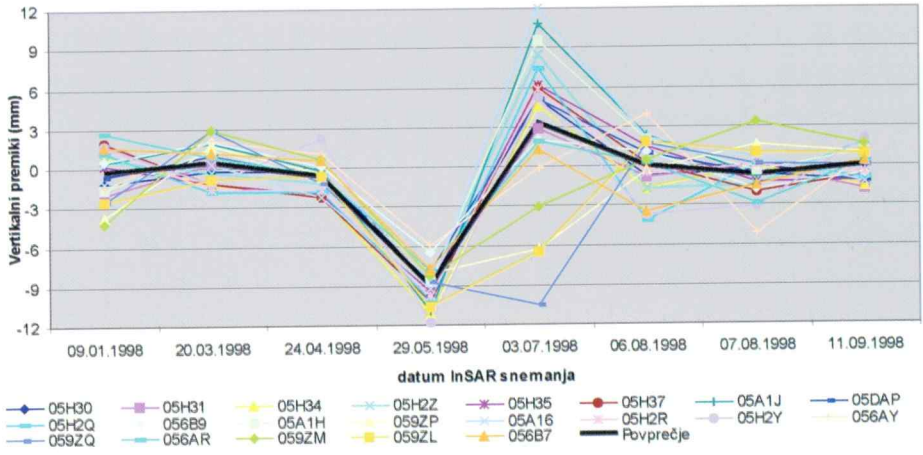
Koseizmični premiki površja ob potresu v Krnskem pogorju 12. aprila 1998

Kot že omenjeno se je v obdobju opazovanja območja raziskav z metodo PSInSAR na območju zgornjega Posočja zgodil močan potres z magnitudo MW = 5,6 (Gosar et al., 2001; Zupančič et al., 2001; Bajc et al., 2001; Vidrih, 2006). Oštir (2000) je s pomočjo diferencialne interferometrije analiziral premike, nastale zaradi omenjenega dogodka. Območje, analizirano z metodo DInSAR je na sliki 7 prikazano z zelenim odtenkom. Na območju Bovške kotline je dokazal minimalne vertikalne premike, nastale ob potresu 12. 4. 1998, ki se na območjih prekrivanja s PS (sl. 7), pridobljenimi za predstavljene analize, statistično dobro ujemajo (Oštir & Komac, 2007). Časovni potek premikov PS na območju, ki ga pokrivajo podatki (sl. 7), pridobljeni z obema metodama, kaže na opazno premikanje podlage Bovške kotline ob potresu in na popotresno uravnavanje površja (sl. 8). Dobro opazni premiki površja v vzhodnem delu Bovške kotline so se zgodili z manjšim časovnim zamikom glede na potres in so na PSInSAR podatkih opazni šele v obdobju med 24. 4. in 29. 5. 1998, torej z zamikom dveh do desetih tednov. Povprečni relativni vertikalni posedek 21-ih PS zaradi potresa je bil, glede na njihovo stanje (torej ne glede na stanje referenčne točke) na 24. 4. 1998 (–)8,4 mm. Temu posedanju



Slika 7. Območje vzhodnega dela Bovške kotline, kjer so bili izmerjene relativne vertikalne komponente premikov. Z rdečo barvo so označeni PS, katerih premiki skozi čas so prikazani na sliki 8 in v preglednici 2. Območje, prikazano na sliki je v večini pokrito s podatki DInSAR analiz, ki jih je opravil Oštir (2000).

Fig. 7. East part of Bovec basin area where relative vertical component displacements have been measured. Red points represent PS for which temporal displacements are show in Fig. 8 and in Table 2. The area displayed in the Fig. 7 is almost whole covered with the DInSAR data, on which Oštir (2000) has performed analyses (shown in transparent green).



Slika 8. Grafični prikaz relativnih vertikalnih komponent premikov v vzhodnem delu Bovške kotline glede na referenčno točko. Lokacije PS so prikazane na sliki 8. Premiki PS so podani v mm. Vse vrednosti so projicirane na navpičnico in predstavljajo vertikalne komponente relativnih premikov. Prikaz se nanaša le na obdobje med januarjem in septembrom 1998, torej nekaj mesecev pred in nekaj mesecev po potresu v Posočju na dan 12. 4. 1998.

Fig. 8. Relative vertical component displacements of PS situated in the east part of Bovec basin according to reference point. Locations of PS are show in Fig. 7. All displacements are given in mm and are projected to the vertical axis. The figure only shows the displacement time span from January to September 1998, covering several moths before and after the 1998 Easter earthquake. The surface displacements related to the earthquake are well seen, first a subsidence of an average 8.4 mm occurred somewhere between two to ten week after the earthquake, followed by an uplift of an average 12.3 mm. The time lag of displacements could be the consequence of post-earthquake surface "equilibration" or a consequence of systematic error of data during their processing, but the later is of negligible possibility.

je sledilo dviganje, v povprečju za 12,3 mm glede na stanje na 29. 5. 1998, v naslednjih obdobjih snemanja SAR podatkov pa so se povprečni relativni premiki umirili (preglednica 2). Relativni premiki glede na referenčno točko so identični, a imajo drugače izražene vrednosti in so prikazani v preglednici 2. Iz slike 8 je možno jasno razbrati »nihanje« površja med aprilom in avgustom 1998, ki bi lahko bilo posledica postopnega in zato časovno nekoliko zamaknjenega popotresnega uravnavanja površja. Časovni zamik premikov v odvisnosti od potresa bi lahko bil tudi posledica sistemske napake pri obdelavi podatkov PSInSAR, kar pa je malo verjetno.

Zaključki

Julijske Alpe se v primerjavi s svojim predgorjem nedvomno dvigajo oziroma je vertikalna komponenta vektorja premikanja obrnjena navzgor. Pojav je bil v preteklosti že nakazan. Relativna hitrost dviganja posameznih točk znotraj Pokrova Julijskih Alp, dobljena z metodo PSInSAR, je nekoliko drugačna od predhodno ocenjenih in je ocenjena na 3,35 mm/leto. Ob bolj konzervativni oceni, ki upošteva vse dvigajoče se PS (povprečna relativna hitrost vertikalne komponente dviga je večja od 0,0 mm/leto) na območju Pokrova Julijskih Alp, je povprečna hitrost dviganja ocenjena na slab milimeter na leto.

Ocenjene hitrosti moramo razumeti z resnim pridržkom, ker so bile pridobljene na podlagi statistične obdelave podatkov in brez dejanske terenske ocene PS.

Bolj neposredno uporabna se je metoda izkazala za identifikacijo koseizmičnih premikov na površju. Najbolj izrazito reakcijo površja smo ugotovili v Bovški kotlini in sicer v povezavi z velikonočnim potresom 1998.

Nadaljevanja raziskav bomo usmerili v analizo horizontalne komponente premikov in geološko oceno kvalitete in pomena posameznih permanentnih sipalcev.

Zahvala

Pričujoča študija je bila sofinancirana iz kohezijskih skladov Evropske komisije skozi program Interreg IIIB – Alpine Space, iz

Preglednica 2. Relativne vertikalne komponente premikov PS, ki ležijo v vzhodnem delu Bovške kotline (slika 8), glede na referenčno točko. Prvi stolpec podaja identifikator PS-a, drugi in tretji njegovo geografsko širino in dolžino, stolpec z oznako "v" predstavlja izračunano povprečno relativno vertikalno hitrost PS in "Koherenca" kvaliteto interference. Zadnjih sedem stolpcev prikazuje relativne vertikalne premike (v mm) glede na referenčno točko. Zadnja vrstica podaja povprečja za posamezne stolpce.

Table 2. Relative vertical displacement components of PS situated in the east part of Bovec basin (Fig. 8) according to reference point. First column is PS identification, second and third represent geographical latitude (N) and geographical longitude (E) respectively. Column "v" represents average relative vertical velocity component of PS, and column "Koherenca" represents coherence level of each PS. Last seven columns represent relative vertical displacements (in mm) according to reference point. Last row represents average values for all 21 PS in the Table 2.

#	Geog. širina (S)	Geog. dolžina (V)	v	Kohe-renca	Premiki glede na referenčno točko (mm)							
					09. 01. 98	20. 03. 98	24. 04. 98	29. 05. 98	03. 07. 98	06. 08. 98	07. 08. 98	11. 09. 98
05H30	46,330465°	13,569659°	-0,80	0,92	-1,12	-0,26	-0,30	-8,81	5,09	-0,79	-0,34	-0,08
05H31	46,330425°	13,569679°	-0,73	0,90	-2,03	0,30	-0,76	-9,10	2,92	-0,87	-0,01	-1,78
05H34	46,330254°	13,569843°	-0,65	0,89	0,99	-1,28	-2,14	-11,17	4,53	-1,65	-0,09	-1,59
05H2Z	46,330501°	13,569660°	-0,47	0,88	0,63	-0,33	-1,19	-8,85	8,52	-1,74	-1,51	1,79
05H35	46,330221°	13,569818°	-1,03	0,87	0,18	-1,13	-1,99	-9,49	6,20	1,45	-1,28	-1,17
05H37	46,330140°	13,569872°	-0,79	0,86	1,89	-1,14	-2,24	-10,18	5,99	0,21	-2,05	-0,73
05A1J	46,336699°	13,568143°	-0,43	0,86	0,39	1,86	-0,17	-10,95	10,88	2,29	-0,81	0,22
05DAP	46,336427°	13,562688°	-0,35	0,86	-0,61	0,91	-0,64	-7,99	5,09	0,96	-0,59	-1,15
05H2Q	46,330772°	13,570047°	-0,37	0,85	1,16	-1,81	-1,84	-10,11	7,48	-4,14	0,13	-0,97
056B9	46,337858°	13,583440°	-0,15	0,84	0,57	2,06	0,15	-6,46	2,05	1,02	-1,77	-0,64
05A1H	46,336732°	13,568162°	-0,36	0,82	-1,62	1,40	-0,71	-8,75	9,51	2,05	-0,41	1,08
059ZP	46,337298°	13,569501°	-0,08	0,80	-3,76	1,71	-0,44	-8,12	-6,21	-0,28	1,55	0,98
05A16	46,337110°	13,568084°	0,11	0,80	-1,21	0,34	-2,18	-9,22	12,00	2,13	0,61	-1,30
05H2R	46,330736°	13,570042°	-0,78	0,78	1,64	-1,61	-1,67	-9,77	5,82	-0,51	-0,01	-0,53
05H2Y	46,330536°	13,569670°	-0,59	0,77	1,75	-1,13	2,28	-11,81	5,24	-3,71	-3,12	2,00
056AY	46,338160°	13,583134°	-0,02	0,77	-1,46	2,13	1,08	-5,90	-0,08	3,95	-5,13	0,64
059ZQ	46,337265°	13,569482°	-0,77	0,75	-2,52	2,83	-1,14	-8,72	-10,48	1,69	0,13	-0,02
056AR	46,338222°	13,583447°	0,12	0,75	2,64	0,90	-0,58	-7,84	1,92	0,25	-2,86	0,34
059ZM	46,337348°	13,569657°	-0,42	0,74	-4,23	2,84	0,63	-8,26	-3,03	0,39	3,34	1,57
059ZL	46,337366°	13,569778°	-0,33	0,74	-2,50	-0,82	-0,68	-10,64	-6,43	1,81	0,95	0,82
056B7	46,337892°	13,583458°	0,63	0,74	1,61	1,17	0,55	-7,76	1,23	-3,54	-1,46	0,35
Povprečje (n = 21)			-0,39	0,82	-0,36	0,43	-0,67	-9,04	3,25	0,05	-0,70	-0,01

lastnih sredstev Geološkega zavoda Slovenije, sredstev Agencije za raziskovalno dejavnost R Slovenije in Ministrstva za okolje in prostor. Avtorja se zahvaljujeta sodelavcem, ki so kakor koli pomagali pri izdelavi analiz ali pa so s svojim znanjem in izkušnjami svetovali pri nastanku prispevka.

Literatura

Bajc, J., Aoudia, A., Sarao, A. & Suhadolc, P. 2001: The 1998 Bovec-Krn mountain (Slovenia) earthquake sequence. – Geophys. Res. Lett., *28*, 1839–1842.

Bavec, M., Budkovič, T. & Komac, M. 2005: Geohazard – geološko pogojena nevarnost zaradi procesov pobočnega premikanja. Primer občine Bovec = Estimation of geohazard induced by mass movement processes. The Bovec municipality case study. – Geologija, *48/2*, 303–310, Ljubljana.

Bianchi, M. & Ferretti, A. 2006: Land deformation monitoring using satellite radar data processed with the Permanent Scatterers Technique (POLIMI PS Technique ™). Processing Report Slovenia, western area ERS descending dataset (Poročilo o izvedbi analiz – 06.008C). – Tele-Rilevamento Europa, 30 p., Milano.

Buser, S. 1987: Osnovna geološka karta SFRJ, list Tolmin in Videm, 1 : 100.000. – Zvezni geološki zavod, Beograd.

Bürgmann, R., Hilley, G., Ferretti, A. & Novali, F. 2006: Resolving vertical tectonics in the San Francisco Bay Area from permanent scatterer InSAR and GPS analysis. – Geology, *34/3*, 221–224.

Carnec, C. & Delacourt, C. 2000: Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry, near Gradane, France. – Journal of Applied Geophysics, *43*, 43–54.

Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F. 2003a: Monitoring Landslides and Tectonic Motion with the Permanent Scatterers Technique. – Engineering Geology, *68*, 3–14.

Colesanti, C., Ferretti, A., Novali, F., Prati, C., & Rocca, F. 2003b: SAR Monitoring of Progressive and Seasonal Ground Deformation Using the Permanent Scatterers Technique. – IEEE Transactions on Geoscientific Remote Sensing, *41*, 1685–1700.

Dixon, T.H. 1995: SAR interferometry and surface change detection (ed.). – Report of a Workshop Held in Boulder, Colorado : February 3–4, 1994, Universtity of Miami. (*http://southport.jpl.nasa.gov/scienceapps/dixon/index.html*, 2006)

Dixon, H.T., Amelung, F., Ferretti, A., Novali, F., Rocca, F., Dokka, R., Sella, G., Kim, S.W., Wdowinski, S. & Whitman, D. 2006: Subsidence and flooding in New Orleans. – Nature, *441*, 587–588.

Ferretti, A., Bianchi, M., Prati, C. & Rocca, F. 2005: Higher-Order Permanent Scatterers Analysis. – EURASIP Journal on Applied Signal Processing, *20*, 3231–3242.

Ferretti, A. & Crespa, S. 2006: Advances in Differential SAR Interferometry: from DInSAR to PSInSAR™. – CSTARS "Height" Workshop October, 24th 2006, Miami, Florida.

Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F. 2000: Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR in-terferometry. – IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, *38/5*, 2202–2212.

Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F. 2001: Permanent Scatterers in SAR Interferometry. – IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing *39/1*, 8–20.

Gams, I. & Ramovš, A. 1990: Julijske Alpe = Jullian Alps. – In: Javornik, M. (Ed.) Enciklopedija Slovenije, *4*, Mladinska knjiga, 352–354, Ljubljana.

Gosar, A., Stopar, R., Car, M. & Mucciarelli, M. 2001: The earthquake on 12 April, 1998 in Krn mountains (Slovenia): Ground motion amplification study using microtremorsand modelling based on geophysical data. – Journal Appl. Geophys., *47/2*, 153–167.

Grenerczy, G., Sella, G., Stein, S. & Kenyeres, A. 2005: Tectonic implications of the GPS velocity field in the northern Adriatic region. – Geophys. Res. Lett., *32*, L16311, doi: 10.1029/20-05GL022947.

Hilley, G.E., Bürgmann, R., Ferretti, A., Novali, F. & Rocca, F. 2004: Dynamic of slow-moving landslides from perma-nent scatterer analysis. – Science, *304/5679*, 1952–1955.

Jurkovšek, B. 1987: Osnovna geološka karta SFRJ, lista Beljak in Ponteba, 1 : 100.000. – Zvezni geološki zavod, Beograd.

Komac, M. 2005: Verjetnostni model napovedi nevarnih območij glede na premike pobočnih mas – primer občine Bovec = Probabilistic model of slope mass movement susceptibility – a case study of Bovec municipality, Slovenia. – Geologija, *48/2*, 311–340, Ljubljana.

Komac, M. & Ribičič, M. 2006: Landslide susceptibility map of Slovenia at scale 1 : 250.000 = Karta verjetnosti pojavljanja plazov v Sloveniji v merilu 1 : 250.000. – Geologija, *49/2*, 295–309, Ljubljana.

Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K. & Rabaute, T. 1993: The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. – Nature, *364*, 138–142.

Massonnet, D., Feigl, K.L., Rossi, M. & Adragna, F. 1994: Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake. – Nature, *369*, 227–230.

Massonnet, D., Thatcher, W. & Vadon, H. 1996: Detection of post-seismic fault zone collapse following the Landers earthquake. – Nature, *382*, 612–616.

Oštir, K. 2000: Analiza vpliva združevanja radarskih interferogramov na natančnost modelov višin in premikov zemeljskega površja : doktorska disertacija. – Univerza v Ljubljani, 175 str., Ljubljana.

Oštir, K. 2006: *Daljinsko zaznavanje*. – Založba ZRC, pp. 250, Ljubljana.

Oštir, K. & Komac, M. 2007: PSInSAR and DInSAR methodology comparison and their applicability in the field of surface deformations – A case of NW Slovenia. – Geologija, *50/1* (v tisku), Ljubljana.

Peltzer, G., Rosen, P.A., Rogez, F. & Hudnut, K. 1996: Postseismic rebound in fault stepovers caused by pore fluid flow. – Science, *273/52-79*, 1202–1204.

Peltzer, G., Crampé, F. & King, G. 1999: Evidence of the nonlinear elasticity of the crust from Mw 7.6 Manyi (Tibet) earthquake. – Science, *286/5438*, 272–276.

Placer, L. 1998: Contribution to the macrotectonic subdivision of the border region between southern Alps and External Dinarides. – Geologija, *41*, 223–255.

Poljak, M., Živčić, M. & Zupančič, P. 2000: The seismotectonic charcteristics of Slovenia. – Pure Applied Geophysics, *157*, 27–55.

Rižnar, I., Koler, B. & Bavec, M. 2005: Identifikacija potencialno aktivnih struktur vzdolž reke Save na podlagi topografskih podatkov in podatkov nivelmanskega vlaka. – Geologija *48/1*, 107–116, Ljubljana.

Rižnar, I., Koler, B. & Bavec, M. 2007: Recentna aktivnost regionalnih geoloških struktur v zahodni Sloveniji. – Geologija, *50/1*, 111–120, Ljubljana.

Vasco, D.W. & Ferretti, A. 2005: On the use of quasi-static deformation to understand reservoir fluid flow. – Geophysics, *70/4*, O13–O27.

Weber, J., Vrabec, M., Stopar, B., Pavlovčič Prešeren, P. & Dixon, T. 2006: The PIVO-2003 experiment: a GPS study of Istria peninsula and Adria microplate motion, and active tectonics in Slovenia. – V: Pinter, N., Grenerczy, G., Weber, J., Stein, S., Medak, D. (eds): *The Adria microplate: GPS geodesy, tectonics and hazards*. NATO Science Series, IV, Earth and Environmental Sciences, *61*, 305–320, Springer.

Vidrih, R. 2006: Geološki vidiki potresa 12. aprila 1998 v zgornjem Posočju : doktorska disertacija = Geological aspects of the earthquake on 12 April 1998 in upper Soča valley : Ph. D. thesis. – NTF Univerza v Ljubljani, 432 str., Ljubljana.

Zupančič, P., Cecić, I., Gosar, A., Placer, L., Poljak, M. & Živčić, M. 2001: The earthquake of 12 April 1998 in the Krn Mountains (Upper Soča valley, Slovenia) and its seismotectonic characteristics. – Geologija, *44/1*, 169–192.

Živčić, M. 2006: Katalog potresov. – Urad za seizmologijo in geologijo, ARSO. Neobjavljeno.