

SKTRF2009 – GEOKINEMATIKA SLOVENSKA

SKTRF2009 – GEOKINEMATICS OF SLOVAKIA

Branislav Droščák¹

Abstract

Processing of the new Slovak kinematics terrestrial reference frame (SKTRF) was enabled by realization of SGRN campaign performed during middle of the 2009 year. The new SKTRF is different against his forerunners, because lot of changes touched with reference frame or processing strategy definitions were appeared and implemented since the last SKTRF had been published. The frame is marked as SKTRF2009 and will be represent the most precise realization of ETRS89 in the territory of Slovakia. In the article is defined computation of his pilot version, the manner of Slovakian geokinematics characteristic estimation is defined, and at last the future steps are described.

Kľúčové slová

SKTRF, SGRN, geokinematika, odhad rýchlosti.

1 ÚVOD

Realizácia ďalšieho ročníka meračskej kampane na bodoch Slovenskej geodynamickej referenčnej siete (SGRN) uskutočnenej na prelome júna a júla tohto roku, umožňuje vykonať ďalší, v poradí už piaty, spresnený odhad Slovenského kinematického referenčného rámca (SKTRF). SKTRF predstavuje najpresnejšiu kinematickú realizáciu Európskeho terestrického referenčného systému 1989 (ETRS89) na území Slovenska, v zmysle definovaných súradníc vybratých bodov Štátnej priestorovej siete (ŠPS) pre konkrétnu epochu Európskeho terestrického referenčného rámca (ETRF), spolu s odhadom polohových charakteristík ich zmien (rýchlostí). Nový kinematický rámec dostal ako zvyčajne pridané označenie 2009 podľa roku realizácie posledne vykonanej SGRN kampane. Nakoľko sa od predošlých zverejnených rámcov SKTRF2007 (*Leitmannová a Havlíková, 2007*) alebo SKTRF2005 (*Leitmannová et al., 2005*) výrazne pohol vývoj a zmenili trendy v oblastiach definovania a realizácii medzinárodných terestrických referenčných systémov (ITRS, ETRS), z ktorých priamo vychádza aj SKTRF, bolo nutné tieto nové poznatky do novej realizácie zapracovať. Uvedená práca preto čiastočne naznačuje akou formou bola pilotná verzia nového kinematického rámca vypočítaná, definuje spôsob odhadu geokinematických charakteristík Slovenska (rýchlostných zmien súradníc bodov), zobrazuje vývoj v porovnaní s predošlými verziami SKTRF a v neposlednom rade definuje odporúčania, akým smerom je potrebné sa v tejto oblasti ďalej uberať. Výsledky a postupy definované v článku je nutné pokladať za predbežné a nie definitívne, nakoľko celá genéza realizácie SKTRF2009 nie je ešte úplne dokončená. Po jej dokončení a schválení na používanie do praxe bude zememeračská a geodetická verejnosť patrične informovaná.

¹ Ing. Branislav Droščák, GKÚ Bratislava, Chlumeckého 4, Bratislava, +421 2 2081 6239, branislav.droscak@skgeodesy.sk

2 VŠEOBECNE O SKTRF

2.1 Definícia a účel

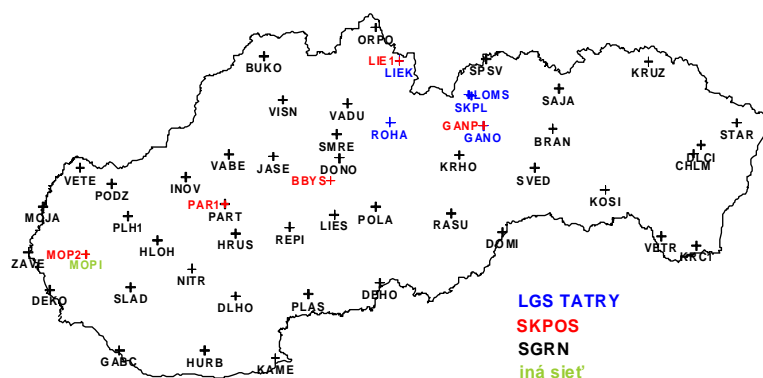
História definovania Slovenského kinematického referenčného rámca (ďalej SKTRF) je úzko spätá s počiatkami budovania generácie nových geodetických základov Slovenska za pomoci družicových technológií. V roku 2002 bol pojem SKTRF v (Klobušíak a Leitmannová 2002) prvý krát spomenutý a definovaný ako: „realizácia ETRS89 na území Slovenska reprezentovaná prostredníctvom aktívnych a pasívnych bodov Slovenskej geodynamickej referenčnej siete“. Tak isto bol od počiatku definovaný aj jeho účel, ktorý možno rozdeliť na:

- realizáciu ETRS89 na území Slovenska,
- skúmanie geodynamiky Slovenska.

Hlavný prínos SKTRF v otázke realizácie ETRS89 na Slovensku spočíval v plnení tzv. presného národného referenčného etalónu, kde body SKTRF slúžili na pripájanie všetkých novobudovaných bodov ŠPS do systému ETRS89. Naopak kinematická charakteristika bodov definujúca smery a veľkosti zmien za časovú jednotku (lokálne alebo globálne rýchlosti) odhadnutá z opakovaných alebo permanentných meraní nám dáva kvalitatívnu informáciu z časového pohľadu a umožní nám definovať napríklad ako často a v ktorých oblastiach bude musieť byť vykonávaná zmena referenčných ETRS89 súradníc bodov SKTRF (resp. celej ŠPS), aby bola zabezpečená požadovaná kvalitatívna homogenita na celom území, alebo môže slúžiť napríklad na lokálne či globálne geokinematické analýzy regiónu (príspevok do geokinematického výskumu Európy).

2.2 Fyzická realizácia

ETRS89 súradnice s charakteristikami presnosti a ich časovými zmenami sú počítané pre fyzickú množinu bodov, rovnomerne rozmiestnenú po celom území republiky. Do tejto množiny spadá celá sieť bodov SGRN a ďalšie vybrané body špecializovaných geodetických sietí s potrebnou tzv. geodynamickou stabilizáciou (obr.1).



Obr. 1 Rozdelenie bodov spadajúcich do SKTRF podľa zaradenia do špecializovaných sietí

Na bodoch týchto sietí sa vykonávajú predovšetkým epochové GNSS merania formou viacdňovo organizovaných kampaní. Hlavnú (nosnú) kampaň predstavuje kampaň SGRN, ktorá sa opakovane uskutočňuje v dvojročnom intervale koncom mesiaca jún. Od spustenia (koniec roka 2006) Slovenskej priestorovej observačnej služby (SKPOS), boli do SKTRF

priradené aj SKPOS body s permanentnou observáciou a spomínanou geodynamickou stabilizáciou (PAR1, LIE1, MOP2). Aktuálne tvorí súčasť SKTRF 7 bodov s permanentnou observáciou (BBYS, GANP, LIE1, MOPI, MOP2, PAR1, LOMS), no napriek tomu vstupujú do spracovania iba ako epochové body.

2.3 Spracovanie

Všetky spracovania GNSS meraní vstupujúcich do SKTRF realizácie sú vykonávané výlučne najnovšou verziou vedeckého softvéru Bernese 5.0 vyvinutého na univerzite v Berne (*Dach et al., 2001*). Ďalšie spoločné spracovanie jednotlivých ročníkov a následný odhad rýchlostných zmien s charakteristikami presnosti už možno vykonávať individuálnym, na to vhodným softvérom. Pri predchádzajúcich realizáciách SKTRF 2001-2007 bol napríklad používaný softvér WIGS (*Klobušiak, 1995-2001*), ktorý uplatňoval matematické spracovanie SKTRF realizácie podrobne definované v (*Klobušiak et al., 2002*).

3 SKTRF2009

Uskutočnenie nového ročníka meračskej kampane SGRN2009, ako aj filozofia neustáleho spresňovania ETRS89 na Slovensku a prirodzená vlastnosť ľudí skúmať svoje okolie (napríklad aj s pohľadu geokinematiky) motivovala predstaviteľov Geodetického a kartografického ústavu (GKÚ) Bratislava navrhnúť a vykonať nový výpočet SKTRF realizácie. Bolo samozrejmosťou použiť na nový odhad najnovšie poznatky a odporúčania z oblasti GNSS spracovaní. Postup výpočtových prác SKTRF2009 realizácie tak bol rozdelený do týchto troch etáp:

1. Spracovanie kampaní
 - a. prepočet pôvodných kampaní
 - b. spracovanie novej kampane SGRN2009
2. Výpočet ETRS89 súradníc - SKTRF2009 realizácia
3. Odhad polohových zmien (rýchlostí) bodov

3.1 Spracovanie kampaní

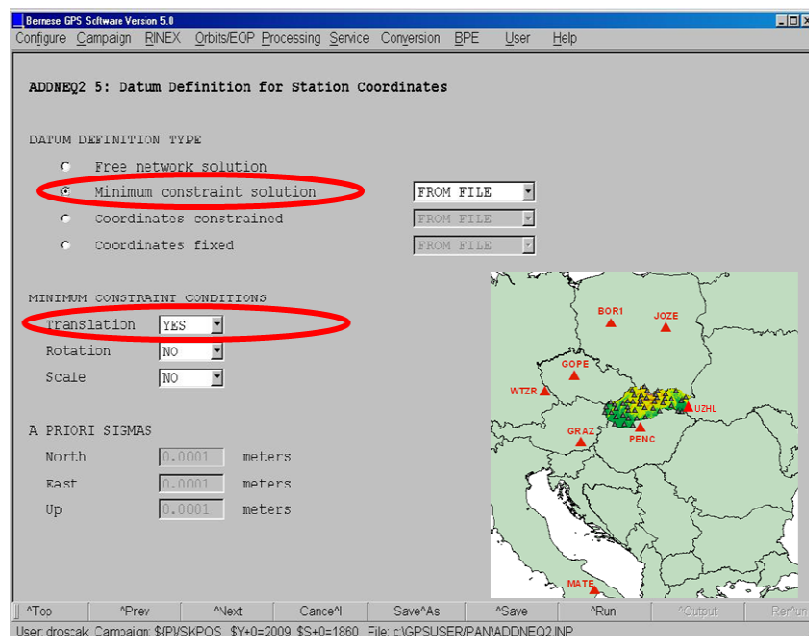
Otázka homogenity, z pohľadu potreby uplatnenia najnovších trendov GNSS presných spracovaní, nás viedla k nutnosti okrem spracovania kampane SGRN2009 prepočítať aj všetky pôvodné relevantné epochové kampane vstupujúce do predchádzajúcich SKTRF realizácií. Prepočet sa týkal kampaní zobrazených v tabuľke 1. Ročníky všetkých kampaní pred roka 1999 neboli použité, nakoľko vykazovali po spracovaní neobvykle veľké rezíduá na referenčných bodoch (stanice IGS siete s definovanými ITRF2005 súradnicami), ktoré boli použité na pripojenie k ITRF2005.

Tab. 1 Kampane použité na výpočet realizácie SKTRF2009

Kampan'	Obdobie	Počet Kampaní
SGRN	1999-2009	7
CEGRN	1999-2009	7
TATRY	1999-2008	10
WHS	2001	1

Postup spracovania bol obdobný ako pri predošlých SKTRF verziách. GNSS merania sa spracovali ako denné riešenia voľnej siete, ale už nie s väzbou iba na jeden bod, ale s väzbou na ťažisko siete definované podmienkou minimal constrain (MC) na referenčných bodoch IGS siete (obr.2). Takto vytvorené denné riešenia sa potom spájali rovnakou podmienkou MC do jedného, reprezentujúce celú kampaň. Základné odlišnosti vo výpočte denných riešení voči predošlým spracovaniam možno zhrnúť nasledovne:

- MC podmienka (minimal constraint – no net translation) na bodoch IGS staníc (obr.2),
- absolútne fázové centrá antén,
- nový rámec ITRS - ITRF2005,
- IGS05 družicové efemeridy,
- efemeridy z Dresden-Potsdam-München prepočtu (*Steingenberg et al., 2006*) - pri starších ročníkoch (kampane pred rokom 2005).



Obr. 2 Uplatnenie podmienky minimal constraint v Bernese 5.0 pre referenčné body IGS siete (body označené červenými trojuholníkmi na mapke)

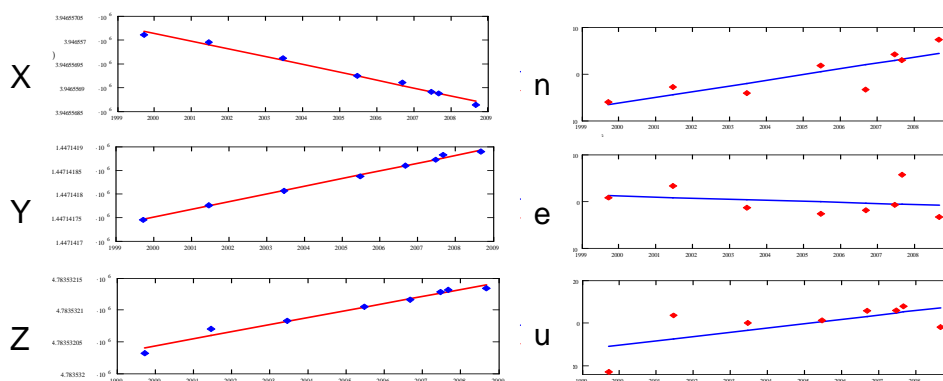
3.2 Výpočet ETRS89 súradníc - SKTRF2009 realizácia

Výpočet pilotnej verzie SKTRF2009 realizácie vychádzal z efektívneho spojenia všetkých normálnych rovníc spracovaných kampaní (tab.1). Pri spájaní programom ADDNEQ2 Bernského softvéru verzie 5.0, bola uplatnená viackrát spomínaná podmienka MC na bodoch IGS siete, ktoré mali definované ITRF2005 súradnice pre strednú epochu výsledného riešenia. Za výsledok spojenia potom považujeme súbor ITRF2005 súradníc všetkých staníc spolu s príslušnou kovariančnou maticou a súborom obsahujúcim porovnanie rozdielov súradníc jednotlivých kampaní (ročníkov). Vypočítané súradnice možno ďalej jednoducho pretransformovať 14-parametrickou transformáciou ITRF2005 → ETRF2000(R05) odporúčanou a definovanou technickou pracovnou skupinou EUREF (EUREF TWG) v známom Memo dokumente verzie 7 (*Boucher a Altamimi, 2008*). Na kontrolu správnosti

možno jednoducho použiť aj ETRF2000(R05) súradnice a rýchlostí EPN bodov prístupné na (www.epncb.oma.be). Detailný postup výpočtu SKTRF2009 realizácie nie je vzhľadom na obmedzený rozsah predmetom tohto článku a bude zrejme zverejnený až po spresnení a schválení v zmysle nižšie definovaných plánov do budúcnosti.

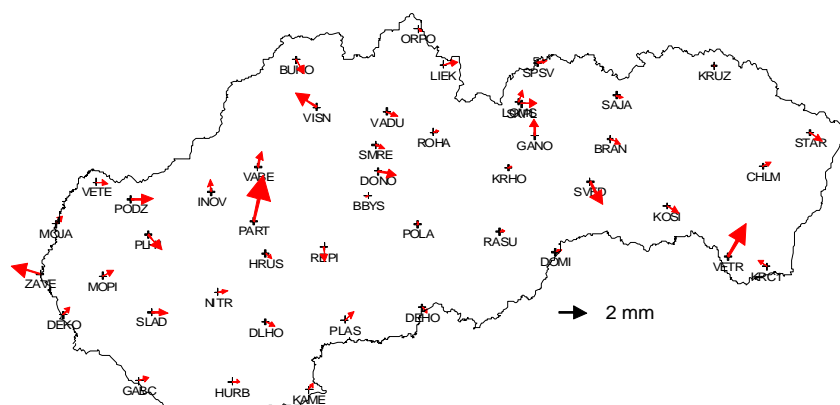
3.3 Odhad rýchlostí

Na odhad polohových zmien (rýchlostí) SKTRF2009 bodov boli použité ITRF2005 súradnice jednotlivých ročníkov spracovaných kampaní. Keďže bola použitá podmienka MC na IGS bodoch, nebolo nutné uplatňovať na uvedené súradnice helmertovu transformáciu na odstránenie posunov a orientácií siete jednotlivých ročníkov. Výpočet globálnych aj lokálnych rýchlostí bol vykonaný v programovom prostredí MathCAD14 jednoduchou lineárnou regresiou. Globálne rýchlosti predstavujú absolútne zmeny polohy bodu v jednotlivých zložkách karteziánskych súradníc (XYZ) ITRS (obsahujú aj pohyb eurázijskej platne). Po odpočítaní rýchlostného modelu ITRF2005 definovanom rotáciami eurázijskej platne v (*Boucher a Altamimi, 2008*) a pretransformovaní karteziánskych súradníc XYZ do topocentrického súradnicového systému (neu) dostaneme tzv. lokálne rýchlosti, ktoré predstavujú skutočný pohyb bodu. Grafický príklad zobrazenia výpočtu globálnych a lokálnych rýchlostí lineárnou regresiou na bode Kráľová hora (KRHO) je na obr.3.



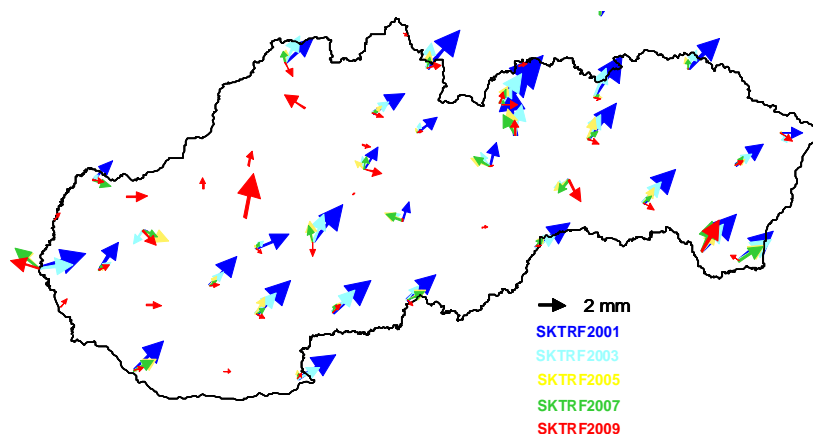
Obr. 3 Zobrazenie výpočtu rýchlostí na bode KRHO

Po vykreslení lokálnych rýchlostí všetkých bodov dostávame pre územie Slovenska vektorovú mapku definujúcu geokinematický charakter územia (obr.4).



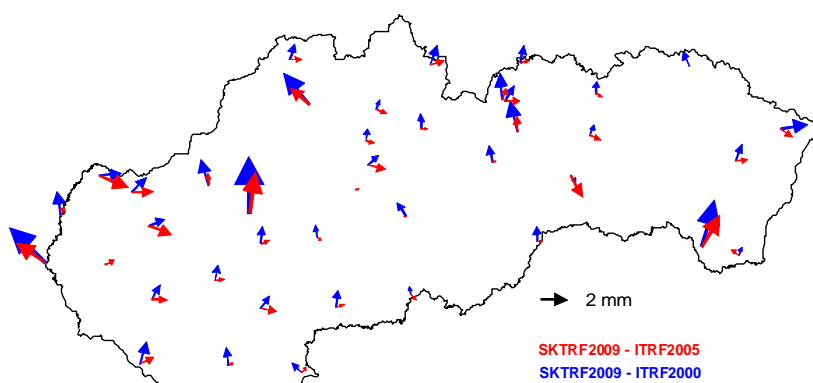
Obr. 4 Ročné rýchlosti bodov pre SKTRF2009

Na základe porovnania vektorovej mapky s predchádzajúcimi SKTRF rýchlostnými realizáciami, možno posúdiť vývoj stability rámca (obr.5). Treba si však uvedomiť, že v predchádzajúcich verziách SKTRF bol použitý iný rýchlostný model (viď. tab2), preto je nutné podotknúť, že obr.5 je iba ilustračný a nie je korektný s pohľadu porovnávania novej verzie SKTRF2009 s jej predchodcami.



Obr. 5 Vývoj stability SKTRF realizácii

Výrazné zmeny spôsobené zmenou rýchlostného modelu možno zreteľne vidieť na obr.6. Z obrázka je zrejmé, že nejde iba o zmeny vo veľkosti vektorov rýchlosti, ale zmeny sa týkajú aj smerov ich orientácií.



Obr. 6 Porovnanie rýchlostných modelov ITRF2000 a ITRF2005

Tab. 2 Odlišnosti medzi jednotlivými SKTRF realizáciami

Obdobie	SKTRFccyy	Rýchlostný model	Cieľový referenčný rámec
Po roku 2007	SKTRF2009	ITRF2005	ETRF2000(R05) epocha 2007.808
1999 – 2009	SKTRF1999-2007	ITRF2000	ETRF2000 epocha 1997.0
Do roku 1999		NNR NUVEL1A	

4 ĎALŠIE SMEROVANIE SKTRF

Pri výpočte prezentovanej pilotnej verzie SKTRF2009 sa objavilo množstvo faktorov, ktoré by mohli výrazne prispieť k skvalitneniu odhadu finálnej verzie SKTRF2009 a zároveň aj jej nasledovníkov. Preto si dovoľujem ukončiť článok formou definovania ďalších krokov v dvoch rôznych časových horizontoch, ako aj z pohľadu budúceho využitia spresneného SKTRF2009.

4.1 Najbližšia budúcnosť

- spresnenie SKTRF2009 – výpočet finálnej verzie
 - výpočet rozšíriť o GNSS merania vykonané na bodoch SGRN počas určovania C triedy ŠPS (roky 2000-2007)
 - nájsť možnosť pripojenia do výpočtu aj relevantné kampane s pred roka 1999
 - zapracovať do SKTRF2009 aj kampaň TATRY2009
- nasadenie spresneného SKTRF2009 rámca do ŠPS (aj SKPOS)
- SKTRF2009 použiť na spresnenie Digitálneho výškového referenčného modelu

4.2 Dlhodobejšia budúcnosť

- pokračovať v ďalšom spresňovaní SKTRF realizácii
 - pokračovať v meraní epochových kampaní,
 - zamerať sa na lokality s anomálnym správaním (body s výraznými rýchlosťami),
- sledovať a analyzovať aj SKPOS permanentné stanice s cieľom pripojenia stabilných staníc do budúcich SKTRFccy realizácii
- pokúsiť sa odhadnúť aj vertikálne zmeny (vertikálne rýchlosti)
- vždy stotožňovať epochy SKTRF a SKPOS realizácii kvôli homogenite geodetických základov
 - posúvať súradnice SKTRF do SKPOS epochy pomocou odhadnutých rýchlostí na bodoch SKTRF

5 ZÁVER

Záverom možno okrem definovania najbližších plánov do budúca (kapitola 4) vysloviť aj praktický poznatok vyplývajúci z prezentovanej pilotnej verzie SKTRF2009 realizácie a to: Evidentné stabilizovanie rýchlostných zmien ako aj samotné odhadnuté horizontálne rýchlosti na bodoch SKTRF (obr.5) dovoľujú vysloviť záver, že pokiaľ nepríde na Slovensku k neočakávanej seizmickej, vulkanickej, alebo inej obdobnej aktivite, alebo nebudú získané a následne odporúčané k zapracovaniu iné poznatky z oblastí GNSS meraní a spracovaní, nemalo by byť nutné, po zavedení finálnej verzie SKTRF2009 (uplatnením návrhov spresnenia v kapitole 4) do ŠPS, v dobe kratšej ako 10-15 rokov zavádzať novú realizáciu.

LITERATÚRA

- Boucher C., Altamimi Z., 2008: Memo : Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign. Version 7 : 24-10-2008.
- Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M., 2001: *Bernese GPS Software Version 5.0*. Astronomical institute, University of Bern.
- Klobušiak M., Leitmannová K., 2002: Slovenská permanentná GNSS služba na prevádzkovanie slovenského priestorového observačného systému – nové geodetické priestorové základy. In: Zborník referátov z odbornej konferencie s medzinárodnou účasťou pri príležitosti 50. výročia založenia Katedry geodetických základov Stavebnej fakulty STU *Geodetické referenčné systémy*, Bratislava STU.
- Klobušiak M., 1995-2001: WIGS - Integrované geodetické siete, transformácie, spájanie, porovnanie, výpočet rýchlostí bodov a transformácie S-JTSK do xTRSYY, odhad parametrov FCA. [Programový systém WIGS 5.2001.1], Bratislava VÚGK & MaKlo.
- Klobušiak M., Leitmannová K., Priam Š., Ferianc D., 2002: Slovak Terrestrial Reference Frame SKTRF 2001, Its Computation and Connection to the EUREF. In: *Reports on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF)*, Vol. 12, Ponta Delgada, Azores, Portugal, pp. 205 - 216.
- Leitmannová K., Havlíková E., 2007: SKTRF2007 – Slovenský terestrický referenčný rámec. In: CD z konferencie *Geodetické siete a priestorové informácie Tatry 2007*, Podbanské.
- Leitmannová K., Klobušiak M., Ferianc D., 2005: Slovenský terestrický referenčný rámec 2005 a vývoj jeho stability. In: CD zborník referátov z konferencie *Geodetické siete a priestorové informácie Tatry 2005*, Podbanské.
- Steigenberger P., Rothacher M., Dietrich R., Fritsche M., Rülke A., Vey S., 2006: Reprocessing of global GPS network. In: *Journal of geophysical research*, Vol. 111, B05402, doi: 10.1029/2005JB003747

<http://www.epncb.oma.be/trackingnetwork/coordinates/index.php>