

HISTÓRIA, SÚČASNOSŤ A CHARAKTERISTIKA RADAROVEJ SATELITNEJ INTERFEROMETRIE INSAR – AKO PERSPEKTÍVNA MONITOROVACIA METÓDA SVAHOVÝCH DEFORMÁCIÍ

JAROSLAV BUŠA

Jaroslav Buša: History, present and characteristics of radar satellite interferometry InSAR – as a perspective monitoring method of slope deformations. Geomorphologia Slovaca et Bohemica, 17, 2017, 1, 12 figs., 1 tabs., 97 refs.

The aim of this work is to present the method of satellite radar interferometry (InSAR) as a method suitable for monitoring slope deformations. At present, we are confronted with a number of scientific works in foreign literature on the subject but in the Slovak scientific community there has been a significant amount of scientific work. In the paper we describe the problem of slope deformations and various current and perspective monitoring methods. The core focus of the work is the historical development and contemporary state of the art, characteristics and the principle of radar satellite interferometry. The persistent scatterer interferometry (PS InSAR) method is also explained. Current space satellite InSAR missions are also described. Finally, we describe the source of errors due to the sensing of the Earth's surface at a certain angle, and we note the advantages and disadvantages of the technique and the suitability of applying the method in various locations currently threatened by slope deformations in Slovakia, where positive results of the scientific community could be expected with the InSAR and PS InSAR methods.

Key words: Radar satellite interferometry, PS InSAR, monitoring methods, slope deformations, Slovakia

ÚVOD

Svahové deformácie na území Slovenska predstavujú jeden z najrozšírenejších a najnebezpečnejších geohazardov krajiny, ktoré zároveň tvoria významnú geobariéru pri urbanizovanom plánovaní a racionálnom využívaní krajiny (MATULA 1995). V 90-tych rokoch minulého storočia sa za hlavný dôvod narušenia stability pri 90 % novovzniknutých zosuvoch situovaných v obývaných územiach podpísal čiastočne alebo úplne nesprávny zásah človeka do stabilného režimu nestabilných geosystémov (PETRYDESOVÁ 2012). Medzi najčastejšie príčiny aktivizácie/reaktivizácie zosuvov patrí rozširujúca sa výstavba sídlisk a obytných domov (Považská Bystrica, Košice), výstavba priemyselných objektov, líniových stavieb (Harmanec, Podkriváň, Podbiel, Veľké Straciny), výstavba vodohospodárskych stavieb (Liptovská Mara, Dobšiná) a ťažobných zariadení (MALGOT a BALIAK 1997, ONDRÁŠIK a GAJDOŠ 2006). S narastajúcim zosuvným rizikom sa kladie aj väčší dôraz na prevenciu proti vzniku svahových deformácií, respektíve na systém včasného varovania, ktorý vychádza z monitorovania svahových pohybov. Aplikovanie rôz-

nych metód monitoringu v problémových zónach a ich vzájomná kombinácia nám umožňuje predvídať aktivizáciu zosuvu a tak predísť stratám na ľudských životoch a rozsiahlym majetkovým škodám. V súčasnej dobe sa ako perspektívna metóda monitorovania svahových pohybov predstavuje radarová satelitná interferometria – ako účinná metóda na monitorovanie veľmi pomalých, až pomalých zosuvov (RASPINI et al. 2014, RASPINI et al. 2017), zosuvov (GREIF a VLČKO 2012, NOTTI et al. 2014, NOTTI et al. 2015, PARADELLA et al. 2015, KAMIYAMA et al. 2017 a ďalší), ako aj nové metódy pri tvorbe mapy registrovaných zosuvov (BONI et al. 2017), alebo tvorbe prognózných máp zosuvného hazardu (RIGHINI et al. 2012, CIGNA et al. 2013, LU et al. 2014, OLIVEIRA et al. 2015). Cieľom príspevku je stručne popísať problematiku svahových deformácií na Slovensku, metódu satelitnej radarovej interferometrie – InSAR, charakterizovať súčasný stav problematiky na Slovensku, v Česku ako perspektívnej monitorovacej metódy svahových deformácií. Dôvodom riešenia problematiky InSAR metódy je množstvo výhod prevyšujúcich nevýhody spojené s danou metódou a v súčasnej dobe voľne dostupné dáta z misie Sentinel-1a) a b), ktoré by mohli po kombinácii so

* Katedra inžinierskej geológie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského v Bratislave, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava 4, Slovensko, e-mail: busa.jaro@gmail.com

zaužívanými metódami monitorovania aktivity zosuvov pomôcť ku kvalitnému posúdeniu stability svahových deformácií.

PROBLEMATIKA ZOSUVOV NA SLOVENSKU

Pojmy svahová deformácia a zosuv sú v zahraničnej literatúre, najmä v anglickom jazyku označované jednotným termínom *landslide*. Na Slovensku sú vo všeobecnosti zaužívané definície svahových pohybov v zmysle klasifikácie podľa NEMČOKA (1982) ako *gravitačný pohyb mas z vyšších polôh do nižších na rozdiel od transportu hornín prenášaných snehom, ľadom, vodou a vetrom*. Prvé termíny popisujúce svahový pohyb ako hazard, sa u nás začali používať v 90-tych rokoch v geografických vedách (DRDOŠ 1992, MINÁR a TREMBOŠ 1994) a neskôr v geologických vedách (MATULA a ONDRÁŠIK 1990, MATULA 1995, HRAŠNA 1998, ONDRÁŠIK et al. 1999), ako aj prognóz geologických procesov (ONDRÁŠIK a RYBÁŘ 1991). Zadefinovanie a zjednotenie pojmov sa podarilo vydaním publikácie Inžinierskogeologický a geotechnický terminologický slovník, ktorého autormi je kolektív pracovníkov ŠGÚDŠ (PETRO et al. 2008). Jedna z posledných publikácií v oblasti všeobecného prehľadu geologických hazardov je od kolektívu autorov ONDRÁŠIK et al. (2011) s názvom *Geologické hazardy a ich prevencia*.

Podľa Inžinierskogeologického a geotechnického terminologického slovníka je svahová deformácia definovaná (z angl. *slope deformation*) ako *výsledná morfológická forma svahového pohybu vyvolaná pôsobením gravitácie, pri ktorom sa vytvorilo teleso odlišujúce sa od okolitého horninového prostredia zmenou vonkajšieho tvaru, plochy alebo objemu, resp. vnútornej štruktúry* (synonymum: svahová porucha, gravitačná svahová deformácia, gravitačná svahová porucha (PETRO et al. 2008). Zosuv (z angl. *landslide*) definovaný ako *typ svahovej poruchy, ktorá vznikla v dôsledku gravitačného pohybu horninových hmôt alebo iných partikulárnych látok po jednej alebo viacerých šmykových plochách* (synonymum: teleso zosuvu; (PETRO et al. 2008).

V rokoch 1997 – 2006 bola riešená geologická úloha s názvom Atlas máp stability svahov SR v mierke 1:50 000 zadaná Ministerstvom životného prostredia SR, ktorej cieľom bolo súborne spracovať všetky registrované svahové deformácie a informácie o výskume do digitálnej podoby v prostredí GIS programov. Celko-

vo na území SR bolo zaregistrovaných 21 190 svahových deformácií, čo predstavovalo približne 5,25 % z celkovej rozlohy krajiny (KOPECKÝ et al. 2008). Kým v roku 2006 zosuvy vznikli najmä po pomerne rýchlom roztopení sa výdatnej snehovej pokrývky, v roku 2010 boli zosuvy aktivizované v dôsledku mimoriadne intenzívnych zrážok. V Prešovskom a Košickom regióne bolo po príválových dažďoch a povodniach v máji 2010 pracovníkmi ŠGÚDŠ v Bratislave zaregistrovaných celkovo 551 novovzniknutých svahových deformácií. Najväčšie škody boli zaznamenané v obci Nižná Myšľa, okres Košice - okolie, kde rozsiahly zosuv poškodil 45 rodinných domov a ohrozil životy obyvateľov. Okrem Nižnej Myšle boli zaregistrované aj zosuvy v Kapušanoch – zosuv pod hradom, v Prešove, v Nižnej a Vyšnej Hutke, vo Vyšnom Čaji, Varhaňovciach a inde. V dôsledku zosuvov bolo poškodených 136 rodinných domov, z ktorých až 38 muselo byť zbúraných (LIŠČÁK et al. 2010).

PREHĽAD ZÁKLADNÝCH METÓD MONITOROVANIA SVAHOVÝCH DEFORMÁCIÍ

Na území Slovenska v súčasnosti prebieha monitoring na viacerých lokalitách, ktoré spĺňajú typologické, regionálno-geologické a ekonomické podmienky požadované v rámci geologickej úlohy *Čiastkový monitorovací systém geologických faktorov životného prostredia SR*, v rámci ktorej bolo v roku 2011 monitorovaných približne 30 lokalít. Bol použitý celý rad rôznych monitorovacích metód od geodetických, inklinometrických cez fotogrametrické až po režimové pozorovania. Prehľad aktuálnych a perspektívnych monitorovacích metód priradených k určitému typu svahového pohybu je uvedený v **Tab. 1**.

Okrem terénnej registrácie zmien zemského povrchu do mapových podkladov, možno používané inštrumentálne metódy monitorovania zosuvov rozdeliť do troch základných skupín: meranie zmien na povrchu zosuvov, merania podpovrchové, režimové pozorovania (WAGNER 2002).

Základným meraním na zosuvných územiach je meranie zosuvných hmôt prostredníctvom posunu bodov monitorovacej siete v určitých intervaloch (WAGNER et al. 2010). Najčastejšie sa využívajú terestrické geodetické metódy (metóda presnej nivelácie a trigonometrické merania), ktoré sa vyznačujú vysokou presnosťou až 1 mm. Táto metóda sa s rozvo-

Typ svahového pohybu	Merané charakteristiky	Metódy monitorovania	
		Meranie vykonávané v súčasnosti	Perspektívne metódy
zosúvanie	a) posun	geodetické - terestrické geodetické - družicové (GNSS) letecká fotogrametria letecké laserové skenovanie	geodetické - laserové skenovanie (LIDAR) diaľkový prieskum (SAR/InSAR) terestrická aplikácia metódy - GB-InSAR
	b) deformácia	presná inklinometria	kontinuálna inklinometria priestorové meranie systémom Trivec časová reflektometria (TDR)
	c) napätostný stav	povrchové reziduálne napätie pole pulzných elektromagnetických emisií (PEE)	mikroseizmické
	d) zosuvotvorné faktory (režimové pozorovania)	hlbka HPV a jej teplota výdatnosť odvodňovacích zariadení zrážkové úhrny	meranie pórových tlakov meranie vodnej hodnoty snehovej pokrývky meranie pôdnej vlhkosti
rútenie	a) posun	dilatometrické meranie fotogrametrické meranie	meranie automatickým dilatometrom fotogrametrické skenovanie terestrické laserové skenovanie
	b) napätostný stav c) zosuvotvorné faktory d) zmeny morfológie skalnej steny	počet mrazových dní mikromorfologické zmeny povrchu horniny	mikroseizmické
plazenie	a) posun	dilatometrické (optickomechanickým dilatometrom TM-71)	

Tab. 1 Prehľad aktuálnych a perspektívnych metód monitorovania svahových pohybov Upravené podľa WAGNER et al. (2010).

jom družicovej geodézie v posledných rokoch často kombinuje, alebo úplne nahrádza presnou družicovou technológiou GNSS (Globálne navigačné satelitné systémy). GNSS metóda z hľadiska využitia nemôže byť úplne nahradená, lebo v prípade zalesneného terénu, nie je aplikovateľná, a preto sa musí kombinovať s terestrickou geodetickou metódou (GILI et al. 2000). Pri meraní deformácií je najrozšírenejšou metódou, metóda presnej inklinometrie. V tomto prípade ide o podpovrchovú metódu merania deformácií horninového prostredia v rôznych hĺbkach (WAGNER et al. 2010).

Ďalším faktorom, ktorý sa monitoruje pri zosúvaní je meranie napätostného stavu, ktorý indikuje napätostný stav prostredia pred vlastným zosunutím. V tomto prípade sa využíva metóda merania poľa pulzných elektromagnetických emisií PEE. Táto metóda umožňuje nájsť miesta s koncentrovaným napätím v rôznych hĺbkach meraného vrtu. Meranie zmien

zosuvotvorných faktorov spočíva v režimových pozorovaniach pozostávajúcich z meraní zmien hĺbky hladiny podzemnej vody, meraním výdatnosti odvodňovacích zariadení a z informácií o zrážkach zo siete staníc SHMÚ. Tieto typy monitorovania sa v súčasnej dobe medzi sebou kombinujú, dopĺňajú a využívajú na viacerých lokalitách ako sú napríklad Veľká Čausa alebo Paradič. Môžeme ich označiť aj ako *klasické* vo význame najpoužívanejšie metódy pri monitorovaní svahových pohybov.

Menej používané sú metódy geodetického laserového skenovania. Napríklad technológia LIDAR (Light Detection And Ranging) a SAR (Synthetic Aperture Radar). Prvá z týchto dvoch metód spočíva v technológii leteckého laserového skenovania, využíva laserovú technológiu so zariadením na určenie polohy a orientáciu. Dosah laserových lúčov sa pohybuje v rozpätí od 1000 do 2000 m s presnosťou 1 cm (WAGNER et al. 2010, BREŽNÝ a PÁNEK 2017). Táto

metóda bola použitá na zachytenie zmeny morfológického stavu po prúdovom zosuve vo Vrátnej doline Štátnym geologickým ústavom Dionýza Štúra.

HISTÓRIA A SÚČASNOSŤ RADAROVEJ SATELITNEJ INTERFEROMETRIE

Radarová satelitná interferometria (z angl. Interferometry Synthetic Aperture Radar – InSAR) je technika, ktorá nám v dnešnej dobe umožňuje merať subcentimetrové deformácie terénu na akomkoľvek mieste na tejto planéte. Vývoj danej techniky je výsledkom dlhoročných vedeckých pokrokov ľudstva a poskytuje nám napríklad popísať dôsledky vplyvu zemetrasení, správania sa a činnosť sopiek, monitorovanie a pohyb ľadovcov, zhodnotenie pohybov v zlomových zónach, zosuvov pôdy a skalných masívov, zhodnotenie dôsledkov lesného požiaru a sledovanie vývoja vegetácie (HANSSEN 2001, LAZECKÝ 2011).

Aj keď k progresívnemu rozvoju a využívaniu satelitnej radarovej interferometrie v rôznych oblastiach vedy a výskumu dochádza najmä v posledných 20 rokoch, ale výskum elektromagnetického poľa siaha do čias Isaca Newtona a Christiana Huygensa (1629 – 1695), ktorí sa považujú za zakladateľov vlnovej teórie. Za významné osobnosti, ktoré prispeli k rozvoju teórie elektromagnetických vln sa považujú Jamesom Clerk Maxwell a Michael Faraday. Ich teoretické poznatky potvrdil v roku 1888 experimentom potvrdzujúcim elektromagnetické vlny Henrich Rudolf Hertz. Všetky získané poznatky vyústili k vzniku kvantovej teórie, ktorej autormi boli Max Karl Ernst a Ludwig Planck. V roku 1904, boli po prvý krát lokalizované objekty prostredníctvom radaru Christianom Hülsmeierom, ktorý nainštaloval zariadenie *telemobiloskop* na lode plávajúce v hmle a vysielanými elektromagnetickými vlnami a následne ich zachytenými odrazmi detekoval objekty, ktoré neboli voľným okom v hmle vidieť (LAZECKÝ 2011). K väčšiemu rozvoju radaru prispela druhá svetová vojna (1939 - 1945). Nevýhoda prvých radarov typu SLAR (z angl. side looking aperture radar) spočívala vo veľkosti antény, ktorá nemohla byť umiestnená na satelite. Riešenie priniesol v roku 1951 Carl A. Wiley, ktorý vynášiel radar označovaný ako SAR (z angl. Synthetic Aperture Radar), ktorého rozlišovacia schopnosť nezávisela od veľkosti antény, ale vychádzala z využitia úzkej časti pulzu založeného na Dopplerovom princípe. Následne došlo k jeho masívnejšiemu apli-

kovaniu v leteckom a kozmickom priemysle pri diaľkovom prieskume Zeme koncom sedemdesiatych rokov minulého storočia (LAZECKÝ 2011).

Prvé použitie technológie InSAR je pomerne mladé a siaha do roku 1987, kedy boli spracované radarové dáta z misie SEASAT (LI a GOLDSTEIN 1987) a o 6 rokov neskôr prvé sledovanie deformácie povrchu po zemetrasení (MASSONNET a ADRAGNA 1993).

V deväťdesiatych rokoch dvadsiateho storočia bola prvýkrát použitá diferenčná satelitná radarová interferometria (DInSAR z angl.: Differential Interferometry SAR), na základe ktorej sa kombináciou viacerých interferogramov dokázalo detekovanie centimetrového porušenia povrchu. Pri aplikovaní spomínanej technológie bol zameraný pohyb územia v priamej viditeľnosti radarového lúča vyslaný zo satelitu v rozličnom časovom období po sebe nasledujúcich SAR obrazov (FATTAHI 2015). Podstatou metódy je výpočet veľkosti a rýchlosti zmien zemského povrchu, pričom sa využíva interferometrická analýza založená na porovnávaní páru SAR snímok z rovnakej oblasti a vplyv topografie je kompenzovaný digitálnym modelom reliéfu (BÁTOROVÁ 2012). Pomocou DInSAR technológie je možné sledovať celkový pohyb medzi dvoma snímkami zhotovenými v rozličnom čase, z čoho vyplýva, že nie je možné rozlišovať lineárny a nelineárny pohyb vyplývajúci zo sledovaného obdobia zo skúmanej oblasti (PERNA 2010). Praktické využitie radarovej techniky DInSAR pri štúdiu zmien povrchu je bližšie popisujú GABRIEL et al. (1989).

Pôvodný DInSAR pozostával z dvoch dátových akvizícií SAR snímok a obsahoval chyby vo vytvorení interferogramu. Atmosferickým vplyvom došlo k oneskoreniu elektromagnetických vln prechádzajúcich cez atmosféru a digitálny model reliéfu vytvorený z dvoch interferogramov bol nepresný a nezohľadňoval topografiu územia. O niečo neskôr sa na Polytechnickom inštitúte v Miláne prišlo s ideou využitia viacerých interferogramov vytvorených z radarových snímok s dlhším časovým obdobím, čo viedlo k vytvoreniu PS InSAR (z angl.: Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar) algoritmu, ktorým sa úspešne vyriešili problémy spojené s atmosférickým oneskorením fázy radarových vln prechádzajúcich cez atmosféru a štatistickým odfiltrovaním chýb v dlhšom rade radarových snímok (FERRETTI et al. 1999, 2001).

Medzi prvé štúdie so zameraním z oblasti zosuvov sa metóda DInSAR použila v roku

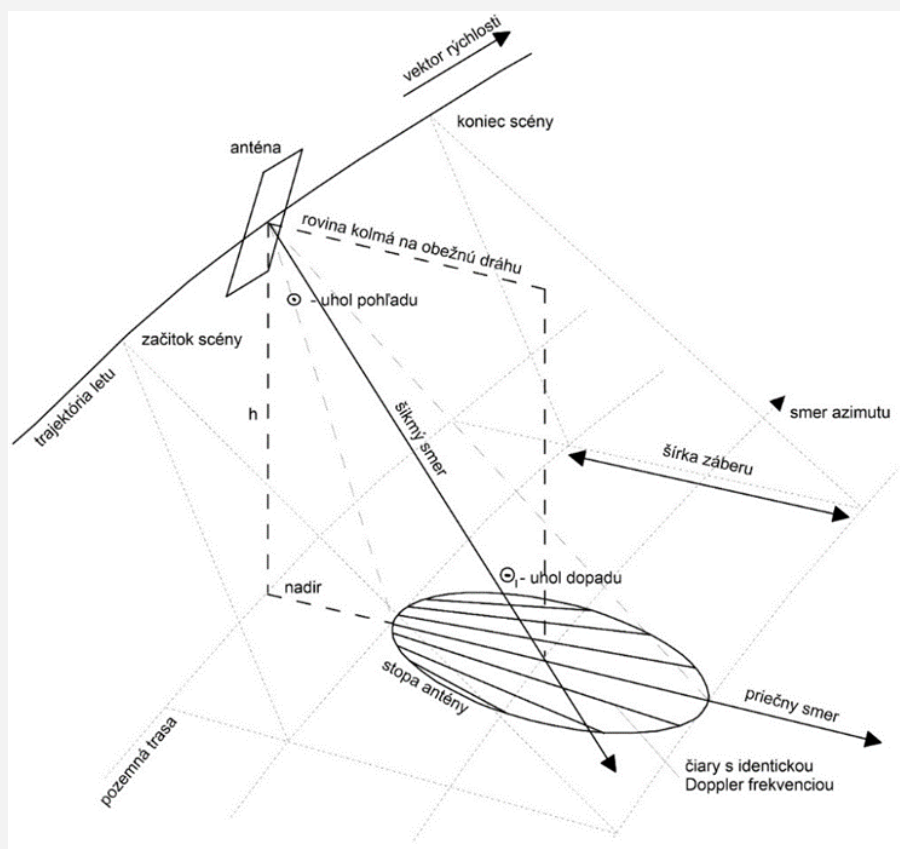
1996 vo Francúzsku (FRUNEAU et al. 1996), v Kanade (SINGHROY et al. 1998) a v Rakúsku (ROTT et al. 1999). Pri monitorovaní zosuvov s pokrytím územia SAR snímkami v dlhšom časovom období a s rýchlosťou pohybu do 1,4 cm/mesiac je dobre využiteľná metóda PS InSAR (COLESANTI et al. 2003, COLESANTI a WASOWSKI 2004, HILLEY et al. 2004, BOVENGA et al. 2006, FARINA et al. 2006, HERRERA et al. 2009). V súčasnosti metódu PS InSAR využívajú CROSETTO et al. (2016) a z oblasti Talianska ROSI et al. (2017). Na území Slovenska sa táto metóda úspešne použila pri monitorovaní zosuvu v Ľubietovej (GREIF a VLČKO 2012) a na zosuve v Nižnej Myšli (BAKOŇ et al. 2015). V Česku, pri monitorovaní poklesu v oblasti Karvinej LAZECKÝ et al. (2017), pri monitorovaní mostu s použitím radarových snímkov z misie Sentinel-1 HLAVÁČOVÁ et al. (2016). Potenciál misie Sentinel-1A pri hodnotení aktívnych zosuvov popisuje LAZECKÝ et al. (2016), použitie metódy InSAR pre monitorovanie aktívnych zosuvov v oblasti Českého Středohoří KADLEČÍK et al. (2016) a poklesov a zosuvov v Severočeské Hnedouhlní pánve ČAPKOVÁ et al. (2006).

CHARAKTERISTIKA A PRINCÍP SAR

Technológiu InSAR – radar so syntetickou clonou zaraďujeme medzi aktívne radarové systémy diaľkového prieskumu Zeme, pretože využívajú vlastný zdroj elektromagnetického žiarenia. Na rozdiel od aktívnych systémov, pasívne radarové systémy DPZ, využívajú prirodzené zemské elektromagnetické, alebo odrazené slnečné elektromagnetické žiarenie, ktoré je miestami obmedzené nedostatkom žiarenia, zapríčinené výskytom hmiel, oblačnosti, nepriaznivých klimatických podmienok. Elektromagnetické žiarenie z aktívnych radarových systémov sa po vyslaní lúča zo senzora odráža od zemského povrchu naspäť k senzoru prijímaču – v takom to prípade hovoríme o monostatickom radare (SKOLNÍK 1962). Hlavná výhoda uvedenej technológie oproti pasívnym radarom spočíva v tom, že elektromagnetické žiarenie sa pohybuje v spektre viditeľného a infračerveného svetla (BAKOŇ 2010). Aktívne radary upevnené na družicových nosičoch nepretržite vysielajú elektromagnetické vlny a spätne zaznamenávajú odrazené elektromagnetické žiarenie, pričom energia prijímaného rádiolokačného signálu obsahuje amplitúdu a fázu elektromagnetického vlnenia, ktoré komponujú radarový snímok. Senzor vysiela elektromagnetické vlnenie rôznej vlnovej dĺžky s určitou frekvenciou

na základe čoho, rozlišujeme 3 základné skupiny pásiem: L,C,X, v ktorých pracujú radarové systémy SAR. Vlnová dĺžka pre skupinu L sa pohybuje od 30,0 cm do 15,0 cm s frekvenciou od 1 až do 2 GHz. Vlnová dĺžka pre skupinu C sa pohybuje od 7,5 do 3,75 cm s frekvenciou od 4 do 8 GHz a vlnová dĺžka pre skupinu X sa pohybuje od 3,75 do 2,4 cm s frekvenciou 8 až 12 GHz (LAZECKÝ 2011). Možnosť využitia mikrovlnného spektra elektromagnetického žiarenia umožňuje SAR systémom snímať zemský povrch bez ohľadu na dennú a nočnú hodinu a elektromagnetické žiarenie, nie je až tak veľmi ovplyvnené meteorologickými faktormi, oproti ostatným metódam určeným na snímanie zemského povrchu (MADSEN et al. 1991). Aby radarové systémy mohli zachytiť priestorové údaje o zemskom povrchu musia byť snímacie senzory orientované pod určitým uhlom takzvaným uhlom pohľadu (z angl. look angle) o danej veľkosti (z angl. off-nadir) (**Obr. 1**). Jeho veľkosť závisí od konštrukcie satelitu a pohybuje sa v rozmedzí 20° - 60°. Vyslaný lúč z antény radaru pod týmto uhlom pohľadu dopadá na snímaný povrch pod určitým uhlom dopadu (z angl. incidence angle) (**Obr. 1**). Jeho veľkosť pri ideálnej situácii by mala byť rovnaká ako veľkosť uhla pohľadu, ale z dôvodu zakrivenia zemského povrchu sa tieto veľkosti uhlov líšia. Smer šírenia elektromagnetického žiarenia sa označuje ako šikmý smer (z angl. slant range direction) a vyjadruje vzdialenosť medzi anténou a snímaným povrchom (z angl. range). Ortogonálny priemet snímaného územia na zemský povrch označujeme ako priečny smer (z angl. ground range direction). Výška (z angl. altitude) predstavuje vzdialenosť medzi družicou a subsatelitným bodom – nadirom, ktorý predstavuje prienik vertikálnej vzdialenosti satelitu so zemským povrchom (**Obr. 1**). Miesto, na snímanom povrchu iluminované jediným pulzom radarového signálu označujeme ako stopa antény (z angl. antenna footprint), šírka záberu (z angl. swath) predstavuje šírku pásu snímaného územia. Pozemná trasa (z angl. ground track) je smer kopírujúci pohyb družice na zemskom povrchu. Smer na povrchu Zeme rovnobežný s trajektóriou družice predstavuje azimut (z angl. azimuth) (**Obr. 1**) pričom radar inštalovaný na družicu zanedbáva rotáciu Zeme (LAZECKÝ 2011).

Rozmiestnenie obrazových prvkov (pixelov) má určitú štruktúru, tvorenú usporiadanými riadkami a stĺpcami. Každý pixel obrazu má priradený index, ktorý určuje jeho polohu v riadku a obsahuje informácie o amplitúde a fáze odrazeného žiarenia nasnímaného povrchu. Reálne rozlišujeme dva typy obrazov, a to rozlíše-



Obr. 1 Geometrické parametre radaru so syntetickou clonou v čase snímania. Upravené podľa CHUWA (2006) HANSEN (2001) a RICHARDS (2009).

nie v smere azimutu a rozlíšenie v priečnom smere.

Rozlíšenie v priečnom smere je konštantné v šikmom snímaní ale mení sa hodnota uhla dopadu na snímaný povrch (RICHARDS 2009; SOERGEL, ed. 2010). Rozlíšenie v smere trajektórie (azimutu) je závislé od vzdialenosti snímaného objektu, od radaru, šírky pulzu, ktorý je vyslaný anténou.

Medzi základné fyzikálne veličiny elektromagnetických vln patrí:

- vlnová dĺžka λ (z angl. wavelength), ktorá predstavuje vzdialenosť medzi opakujúcimi sa periódami elektromagnetického žiarenia a jej hodnota určuje schopnosť mikrovlnného žiarenia prenikať cez atmosférické faktory, alebo vegetáciu (**Obr. 2**),
- amplitúda elektromagnetického žiarenia y (z angl. amplitude), ktorá predstavuje maximálnu hodnotu energie elektromagnetického lúča (**Obr. 2**),
- fáza φ (z angl. phase) určuje relatívnu po-

lohu na vlne v čase kmitavého pohybu (**Obr. 2**).

Digitálny radarový obraz predstavuje súbor pixelov usporiadaných v riadkoch a stĺpcov, z ktorých každý jeden pixel nesie hodnotu 1 alebo 0, pričom 1 je vyjadrená čiernou farbou a 0 bielou farbou. Výsledný raster, ako dátová forma obrazu pozostáva z hodnôt komplexných čísel, nesúcich informácie nie len o amplitúde a fáze spätného odrazu, ale aj o všetkých rušivých vplyvoch zapríčinenými napríklad skalami, vegetáciou, budovami atď. v každom jednom pixeli, čiže vyjadruje informáciu o vlastnostiach odoslaných a prijatých elektromagnetických vln (FÉRRETTI et al. 2007).

Princíp zápisu komplexného čísla (**Obr. 2**), kde reálna a imaginárna os predstavuje vlastný inerciálny súradnicový systém, z ktorého je možné určiť konkrétnu polohu bodu v priestore v danom čase. Z uvedeného ortogonálneho súradnicového systému teda vyplýva, že imaginárna jednotka $j=\sqrt{-1}$ a krajné koordinačné body vyplývajú z rov-

nice $2.3+2j$, čo korešponduje s amplitúdou y a fázou φ a jednoducho súhlasí s komplexným číslom $y=|y| \cdot \exp(j\varphi)$. Vzťah medzi fázou a amplitúdou signálu, pohybujúceho sa od antény k snímanému povrchu a naspäť k anténe, ktorý vychádza z nasledujúceho matematického vzťahu (FERRETTI et al. 2007):

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2r = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot r \quad (1)$$

kde r je vzdialenosť družice od snímaného objektu. Napriek tomu, že fáza tvorí podstatnú informáciu, tak systém môže merať iba v rozsahu 2π . Pre získanie informácií z fázy radarovej snímky je potrebné porovnať minimálne dve radarové snímky. Tieto radarové snímky sa skladajú z komplexných čísel, ktoré sú zapísané v pixeloch oboch radarových snímok:

$$y_1 = |y_1| \cdot \exp(j\varphi_1); y_2 = |y_2| \cdot \exp(j\varphi_2) \quad (2)$$

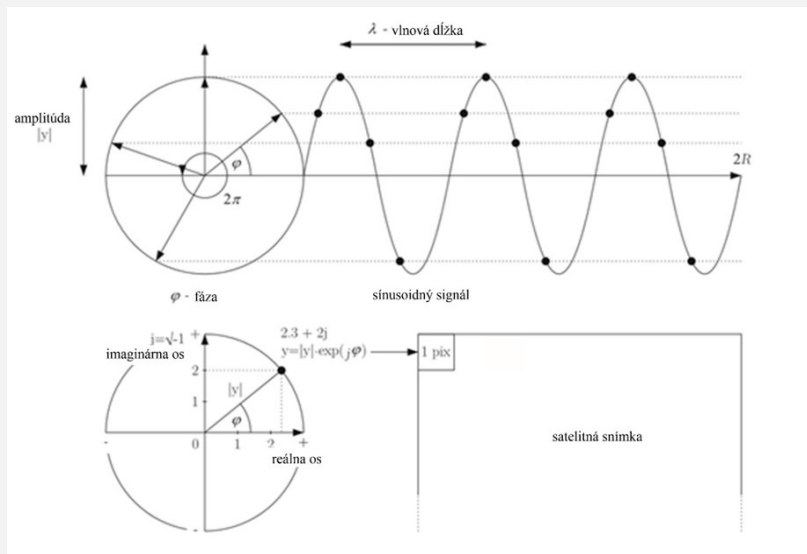
Ak satelit nasníma rovnaké územie opätovne, tak hodnota fázy by mala byť rovnaká, ale vzhľadom na meniace sa prírodné podmienky vyplývajúce z pohybu geodynamických javov, atmosférických vplyvov a vegetačných cyklov, pozmenených orbitálnych dráhach satelitov dochádza k zmene vo fáze (BAKON 2012). Fáza je teda významná fyzikálna veličina využívaná pri spracovaní interferogramov z radarových snímok, pričom InSAR detekuje deformácie povrchu na základe vzniknutého rozdielu medzi fázami (ROSEN et al. 2000).

Rozdiel medzi fázami sa dá vyjadriť algebrickou úpravou z rovnice 2 na:

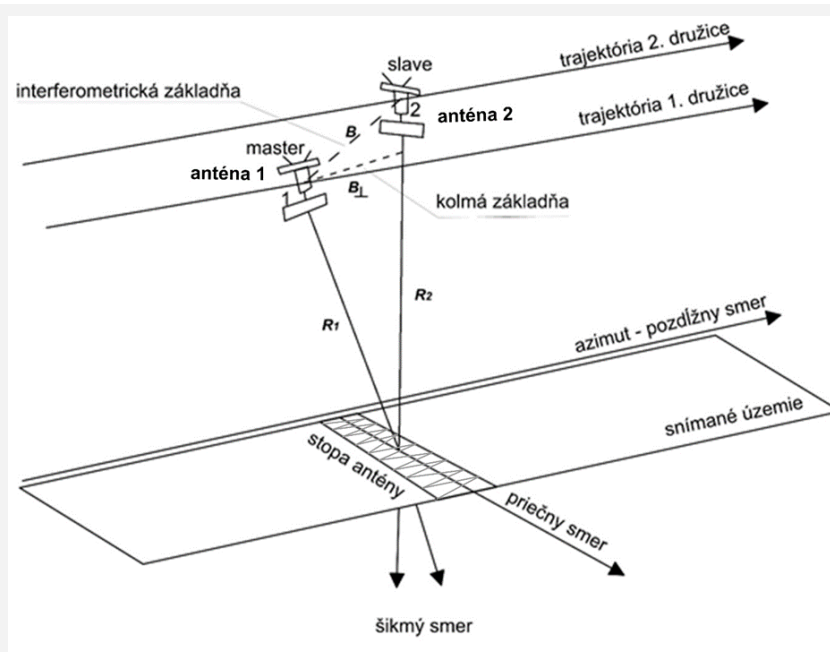
$$\begin{aligned} y_1 y_2^* &= \\ |y_1| \cdot \exp(j\varphi_1) \cdot |y_2| \cdot (-j\varphi_2) &= \\ |y_1| |y_2| \exp(j(\varphi_1 - \varphi_2)), \end{aligned} \quad (3)$$

kde jednotlivé pixely obsahujú rozdiel medzi fázami ($\varphi_1 - \varphi_2$), alebo interferometrickú fázu $\Delta\varphi$ s hodnotami, ktoré je možné zobrazit farebnými prúžkami a hodnotami pohybujúcimi sa v intervale od $-\pi$ do $+\pi$ a následne môžu byť prekonvertované do mapy (BAKON 2012).

Interferometrické spracovanie vyžaduje spracovanie minimálne dvoch snímok pokrývajúcich rovnaké územie. Z toho dôvodu sa zber dát môže uskutočňovať viacerými spôsobmi a to buď inštaláciou SAR systémov súčasne na jednu platformu, kde sú systémy umiestnené na jednej platforme vo vzdialenosti teleskopického ramena (misia SRTM, misia TanDEM-X). Druhým spôsobom je snímání povrchu viacerými satelitmi snímajúcimi povrch v určitom časovom horizonte (ENVISAT, ERS-1, ERS-2), približne 35 dní pre satelity ERS-1 a ERS-2, pri ktorých sa časový interval medzi dvoma po sebe nasledujúcimi akvizíciami skráti na 1 až 8 dní (DUCHOSSOIS a MARTIN 1995). Satelity misie ERS-1/2 obiehali okolo Zeme po vzostupnej (z angl. ascending) obežnej dráhe v smere juh – sever a zostupnej (z angl. descending), obežnej dráhe v smere sever – juh, z čoho im prislúchajú aj patričné pomenovania, keď v prvom prípade hovoríme o ascending SAR snímkach a v druhom o descending SAR snímkach



Obr. 2 Charakteristické parametre elektromagnetickej vlny v rámci jednej radarovej snímky. Upravené podľa FERRETTI et al. (2007).



Obr. 3 Poloha satelitov pri snímaní metódou SAR. Upravené podľa FERRETTI et al. (2007).

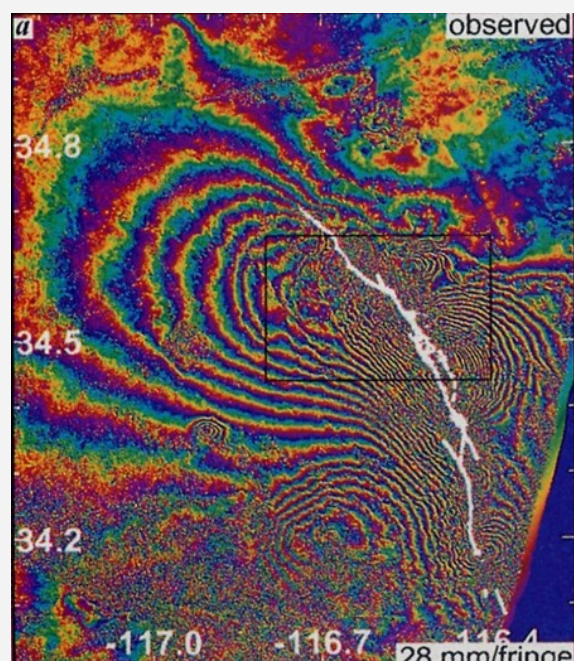
(BÁTOROVÁ 2012). Cyklus snímania zemského povrchu menej ako 5 dní je možný vďaka štyrom satelitom misii COSMO-SkyMed. Snímkovanie dvojicou satelitov na vlastných orbitách

je najpoužívanější metódou pri získavaní údajov.

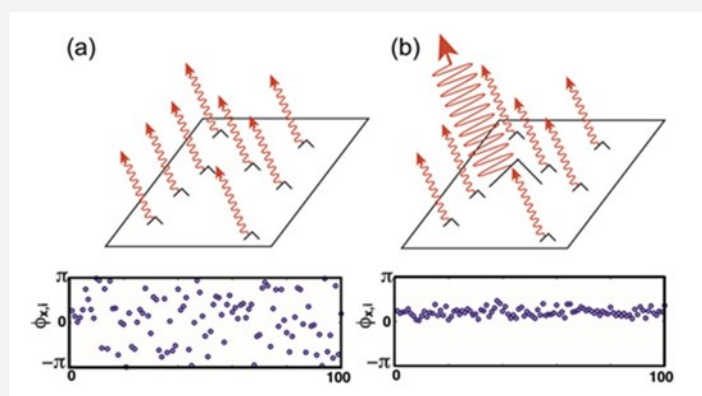
Priestorová vzdialenosť B medzi radarmi v okamihu snímania kolmá na smer pohybu družice produkujúca hlavný MASTER snímok sa označuje ako *interferometrická základňa* (z angl. *interferometric baseline*) (**Obr. 3**). Vektorová zložka $B_{\perp}$ označovaná ako *kolmá základňa* (z angl. *perpendicular baseline*) je kolmá na smer vyslaného snímajúceho lúča po trajektórii R_1 alebo R_2 (**Obr. 3**). Časový interval medzi dvoma observáciami toho istého územia sa označuje ako *časová základňa* (z angl. *temporal baseline*) (FERRETTI et al. 2007).

Pre generovanie digitálneho modelu reliéfu je optimálna kolmá základňa v rozmedzí 150 – 300 metrov. Interferogramy s malými kolmými základňami do 30 m sú citlivé na atmosférické vplyvy a fázový šum a interferogramy s kolmou základňou nad 450 m sú zvyčajne nepoužiteľné kvôli nekorešpondujúcej koherencii a malé hodnoty blízke k nule na kolmej základni sú ideálne pre sledovanie a detekciu deformácií (**Obr. 4**) (FERRETTI et al. 2007).

Dôležité pre prienik impulzov elektromagnetického žiarenia na zemský povrch je závislé v ktorom z pásiem mikrovlnnej oblasti spektra radar SAR pracuje. Penetrácia žiarenia je závislá od frekvencie a vlnovej dĺžky, pričom čím je vlnová dĺžka signálu dlhšia, tým prienik impulzu napríklad cez vegetáciu bude výraznejší.



Obr. 4 Interferogram zachytávajúci pohybové pole po zemetrasení v Landers v Kalifornii. Upravené podľa MASSONNET et al. (1993).



Obr. 5 Reflektivita odrazových bodov medzi a) DInSAR b) PS InSAR. Upravené podľa HOOPER (2006).

PS INSAR (PERSISTENT SCATTERER - INSAR)

Metóda PS InSAR je pokročilá metóda multi-temporálnej satelitnej radarovej interferometrie, ktorá bola vyvinutá za účelom sledovania povrchových deformácií na rozsiahlych územiach s vysokou presnosťou a odstránením nedostatkov vyplývajúcich z použitia metódy DInSAR (FERRETTI et al. 2000, 2001).

Štyri hlavné rozdiely medzi spomínanými metódami sú podľa NG a GE (2007):

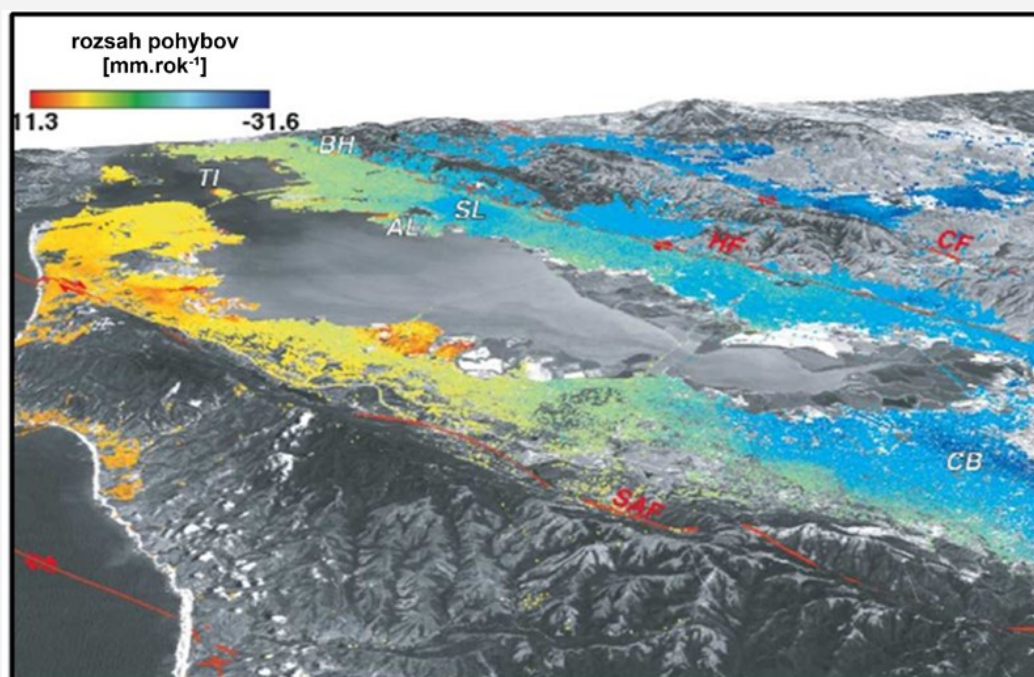
- šum spôsobený prechodom signálu cez atmosféru,
- časová dekoherencia bodov na povrchu z dôvodu prítomnosti vegetácie a povrchových deformácií,
- nekoherentnosť snímok z dôvodu dlhšej časovej základni medzi dvoma SAR akvizíciami (snímaniami),
- ambiguity limitujúce dosiahnuť plného využitia metódy.

Najväčší rozdiel medzi klasickými InSAR metódami a PS InSAR je to, že sa kladie dôraz na koherenciu (ktorá musí mať hodnoty nad $> 0,7$ na jeden pixel). Koherenciu môžeme chápať ako mieru fázovej stability medzi dvoma SAR snímkami (veľkosť koherencie sa pohybuje v rozpätí od 0 do 1), pričom dobrá kvalita interferogramu je reprezentovaná viditeľnými prstencami (hodnoty koherencie sa blížia k hodnote 1) a zhoršená viditeľnosť prstencov, čiže nižšia kvalita interferogramu je nižšia, môže byť zapríčinená fázovými chybami (ZHANG a PRINET 2004, LAUKNES et al. 2008).

Pre použitie v PS InSAR majú odrazové body vysokú mieru odrazivosti. Predovšetkým ide o antropogénnou činnosťou vytvorené technické

zariadenia, ako budovy, stĺpy, cesty, mosty atď sústredené najmä v urbanizovanej oblasti (PORZYCKA a LEŠNIAK 2011, FERRETTI et al. 2004, 2011). Výber odrazových PS bodov je založený na analýze amplitúdy fázovej stability PS bodov (Obr. 5). Tak ako v metóde DInSAR, tak aj pri metóde PS InSAR môžeme použiť digitálny model reliéfu, pretože každá výška PS bodu sa vypočítava, čo naopak umožňuje použiť PS odrazové body pre zlepšenie kvality DMR modelu, ak sa takéto body samozrejme vyskytujú v danom modeli (BAKON 2012). Nevýhodou metódy PS InSARu je meranie deformácií len v smere snímania povrchu. Spracovaním radarových snímok zo zostupnej a vzostupnej obežnej dráhy a prepočítaním algebrickými úpravami (COLESANTI a WASOWSKI 2006, CASCINI et al. 2010, GREIF a VLČKO 2012) môžeme určiť veľkosť deformácie nie len v smere východ-západ, ale aj v smere sever-juh. Maximálna veľkosť deformácie, ktorá môže byť meraná, je polovica vlnovej dĺžky, za obdobie medzi akvizíciami (KIM et al. 2007). Spôľahlivé určenie veľkosti deformácií je možné, ak je dostatočne veľký dátový súbor radarových snímok, zvyčajne minimálne 20 bodov (PERISSIN et al. 2008).

V prípade satelitného systému ENVISAT je kritická deformačná rýchlosť 2,8 cm za 35 dní (PORZYCKA a LEŠNIAK 2011). V súčasnosti sú dostupné satelity pracujúce na C-pásme, pri ktorých môžeme merať deformácie od 4 do 5 cm za rok (CROSETTO et al. 2010). Systém satelitov pracujúcich na X-pásme (TerraSAR-X, COSMO-SkyMed) nám umožňuje merať deformácie nad 50 cm za rok. Napriek tomu, že PS InSARom môžeme merať pomerne malé deformácie, ale je veľmi ťažké merať veľmi malé deformácie 1 mm/rok (BAKON 2012). Hustota odrazových bodov PS sa pri C-pásme vo vidieck-



Obr. 6 PS odrazové body (farebné body v intervale od 11,3 do -31,6 mm/rok) v oblasti San Francisca na 3D DMR, kde sa nachádza San Andreašská, Haywardská a Calaveraská zlomová línia. Upravené podľa FERRETTI et al. (2004).

kych oblastiach pohybuje od (<10 PS/km²) po (>100 PS/km²) v mestských oblastiach môže byť ešte väčšia, v prípade použitia satelitov pracujúcich na X-pásme BAKOŇ 2012). Znázornené PS odrazové body (**Obr. 6**) vyjadrené farebnou škálou na digitálnom modeli reliéfu znázornené v 3D projekcii.

CHYBY SPÔSOBENÉ PRI SNÍMANÍ POVRCHU

Vlastnosti SAR obrazov v priečnom a pozdĺžnom smere sú rozdielne a preto je potrebné poznať geometriu snímania Zeme. Variabilita topografie spôsobuje relatívne veľké skreslenie SAR obrazov v priečnom smere, ako i pri pozdĺžnom smere snímania povrchu. Pozícia každého objektu snímania je zaznamenaná ako funkcia doby trvania vyslaného impulzu z radaru na snímaný povrch. Znázornené možnosti snímania rôznorodej topografie povrchu (**Obr. 7**) a projekcia snímanej roviny v radarovej snímke je prezentovaná ako projekcia bodov do takzvanej šikmej roviny v priečnom smere snímania.

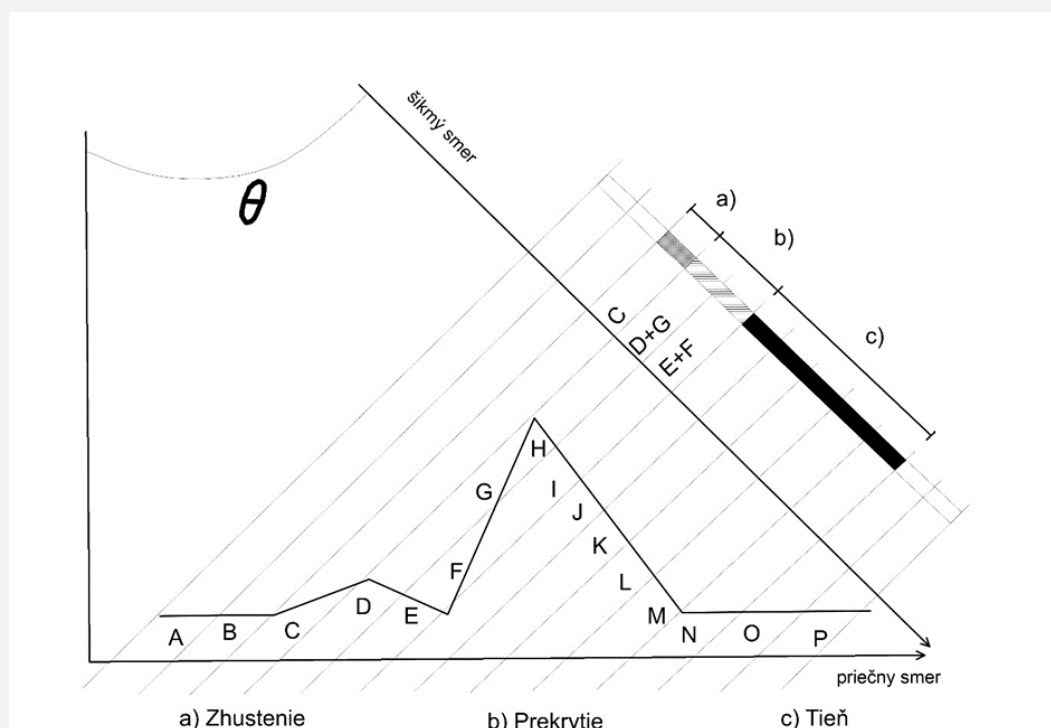
Vzdialenosť medzi senzorom a objektom je lineárna, ale projekcia jednotlivých bodmi roviny je nelineárne deformovaná (BAMLER a HARLT 1998). Aj relatívne nízke nadmorské

výšky reliéfu dokážu ovplyvniť skreslenie výsledného SAR obrazu v šikmom smere vyslaného elektromagnetického lúča. Následne dochádza ku takzvanému zhutneniu (z angl. foreshortening), dáta z územia o väčšej ploche majú rovnakú vzdialenosť od radaru a sú zhustené do malej plochy záznamu. K najväčšiemu zhutneniu dochádza pri strmom svahu, ktorý je kolmý k radarovému lúču (**Obr. 7**). Prekrytie (z angl. layover) ide o extrémny prípad zhutnenia, ku ktorému dochádza v prípade, ak je uhol pohľadu menší než lokálny sklon svahu (**Obr. 7**). Tieň (z angl. shadow), územie, ktoré je úplne zakryté pred dopadom žiarenia, nedochádza k žiadnemu odrazu. Táto chyba sa prejavuje v strmých terénoch pri snímaní pod veľkým uhlom pohľadu. Veľkosť tieňa v opačnom prípade dokáže poslúžiť k určeniu veľkosti objektu (**Obr. 7**). Jednotlivé dôsledky zachytené na radarovej snímke sú znázornené na **Obr. 8**.

Chyby, spôsobené snímaním povrchu pod určitým uhlom, je možné čiastočne odstrániť pridaním vopred spracovaným digitálnym modelom reliéfu.

SATELITY SAR NA OBEŽNEJ DRÁHE

V súčasnosti sa na diaľkovom prieskume Zeme metódou InSAR podieľa päť veľkých spoločností: európska ESA (European Space



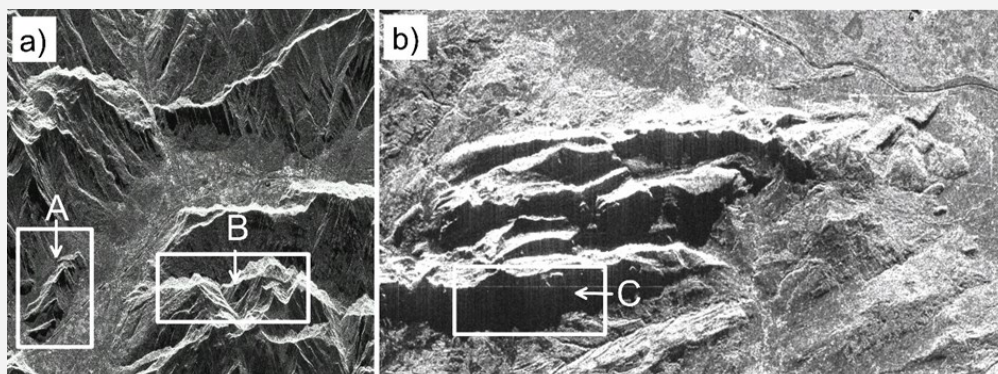
Obr. 7 Deformácie vzniknuté na SAR snímkach vplyvom veľkosti uhla dopadu medzi povrchom a vyslaným lúčom. Upravené podľa BAMLER a HARLT (1998).

Agency), japonská JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency), nemecká DLR (German Aerospace Center), kanadská MDA (MacDonald Dettwiler and Associates) a americká NASA (National Aeronautics and Space Administration). Prehľad historických, súčasných a plánovaných misií je zobrazený na obrázku 9.

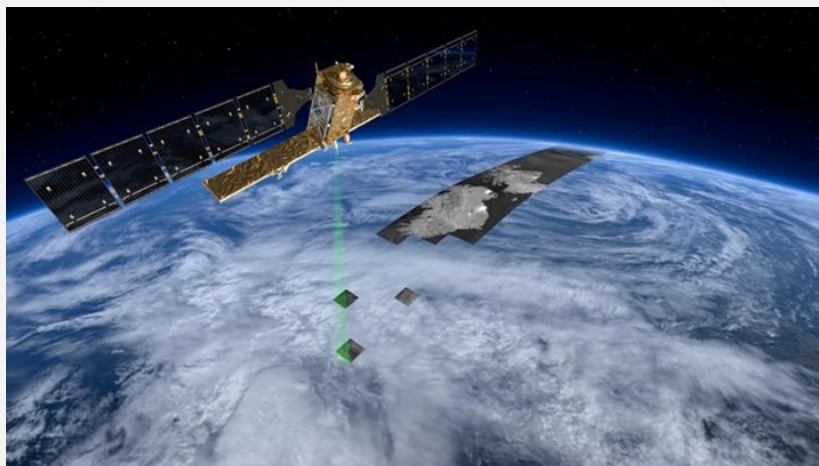
Najvýznamnejšie misie: satelity ESA - Sentinel-1A (v prevádzke od 3.4.2014) a Sentinel-1B (v prevádzke od 25.4.2016) (**Obr. 9**), pre projekt GMES, je tvorená dvoma satelitmi pra-

cujúcich na C-pásme, zabezpečuje sledovanie morského ľadu, morského prostredia a zemského povrchu (ATTEMA et al. 2007).

Kanadská misia RADARSAT-1 bola v prevádzke od roku 1995 do roku 2013, RADARSAT-2 pôsobí na obežnej dráhe od roku 2007 do súčasnosti (**Obr. 10**). Misia TerraSAR-X bola vylepšená a od júna 2010 a spolu s druhým satelitom v nominálnej vzdialenosti niekoľko sto metrov s orbitálnou rýchlosťou $7,5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ a s časovou základňou do niekoľkých desiatok



Obr. 8 Dôsledky, spôsobené snímaním zemského povrchu pod uhlom na radarevej snímke a) z misie ERS-1 b) z misie SRTM - A) zhustenie B) prekrytie C) tieň.

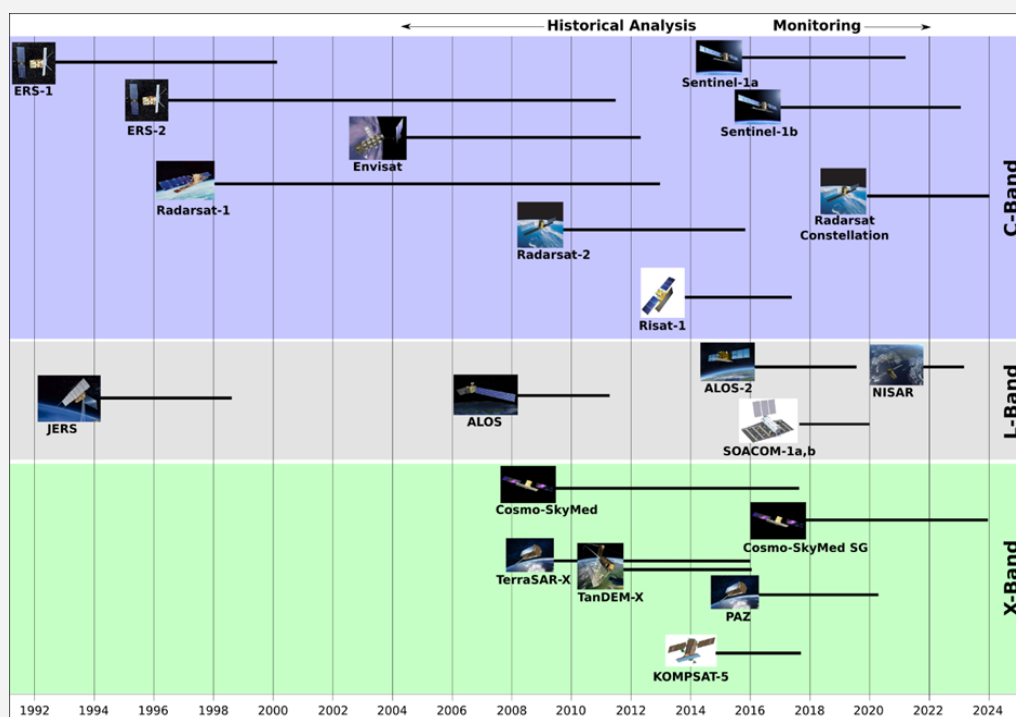


Obr. 9 Sentinel-1A (ESA 2016)

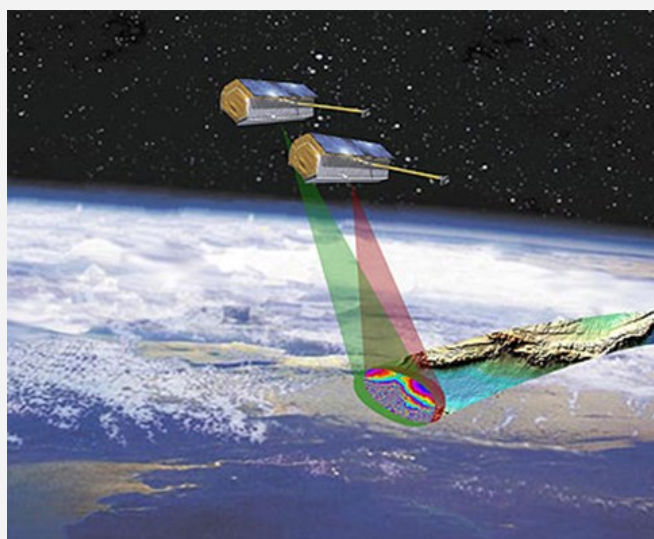
milisekúnd tvoria konšteláciu s názvom Tandem-X, ktorá generuje digitálny model reliéfu s rozlíšením 12 až 10 m s výškovou relatívnou presnosťou na 2 m (GOTTWALD et al. 2017, YAMAZAKI et al. 2017) (**Obr. 11**). Satelity majú jedinečnú schopnosť generovať bistatické SAR obrazy (jeden satelit vysiela radarový signál, zvyšné dva satelity prijímajú odrazové vlny). Získané údaje majú veľký význam pre odhad drsnosti povrchu, sklonu terénu a v ko-

nečnom rade majú uplatnenie aj v meteorológii (KRIEGER et al. 2007).

Misia Cosmo-SkyMed (Constellation of Small Satellite for Mediterranean basin Observation) pozostáva zo štyroch satelitov fungujúcich na X-pásme, poskytujú výhodný krátky čas, menej než 5 dní na znovu zhodnotenie rýchlych dynamických javov (**Obr. 12**). Hlavná oblasť štúdie je oblasť Stredozemného mora. V prevádzke je od roku 2010 a každý jeden satelit



Obr. 10 Prehľad historických, súčasných a plánovaných misií SAR pracujúcich v troch základných pásmach (UNAVCO 2015)



Obr. 11 TerraSAR-X/TanDEM-X (DLR 2009).

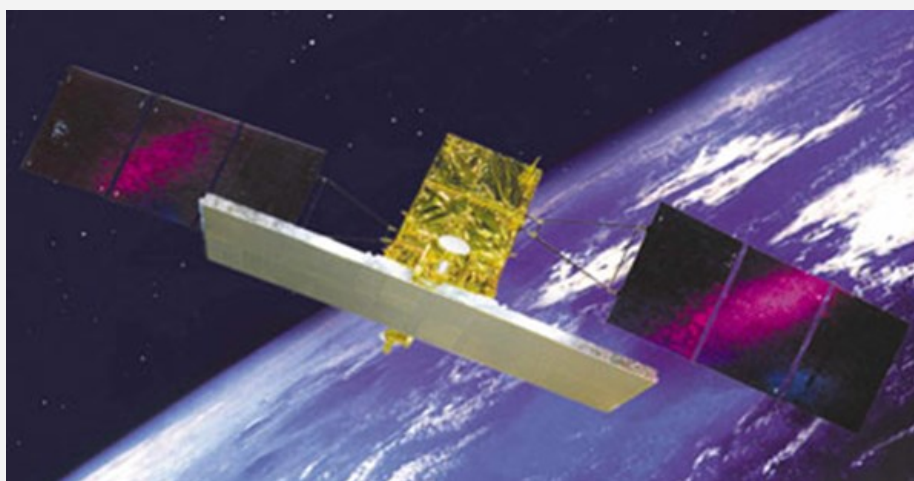
obehne Zem za 16 dní, čo umožňuje tvorbu SAR akvizícií každé 4 dni. Taktiež satelity môžu dosiahnuť takzvanú *tandemovú interferometriu*, kedy sa dva satelity dostanú do rovnakého postavenia na približne 20 sekúnd (COVELLO et al. 2010).

Kórejská misia Kompsat-5 a na ňu nadväzujúca Kompsat-7 vychádzajú z čínskeho projektu SMMS a tvorená je štyrmi satelitmi pracujúcimi na S-pásme (WANG et al. 2005).

VYUŽÍVANIE INSAR NA SLOVENSKU

V súčasnosti s rozširujúcou sa výstavbou nových sídlisk, priemyselných objektov, líniových

stavieb a kombináciou intenzívnych zrážkových úhrnov a nesprávnym zásahom človeka do životného prostredia narastá riziko aktivizácie nových a reaktivizácia starých ukludnených zosuvov (MALGOT a BALIAK 1997, ONDRÁŠIK a GAJDOŠ 2006). S narastajúcim rizikom zosuvného hazardu stúpa aj miera prevencie založená najmä na monitorovaní oblastí so zvýšeným rizikom zosuvného hazardu. V práci WAGNER et al. (2010) popisujú autori súčasné a perspektívne metódy monitorovania svahových pohybov, kde sa ako perspektívna metóda monitorovania prezentuje aj radarová satelitná interferometria. Výhoda metódy InSAR je v podobe archívneho úložiska dát jednotlivých vesmírnych misiách, kedy je možné sa spätne



Obr. 12 Jeden zo štyroch satelitov CosmoSkyMed (GUNTER'S SPACE PAGE 2017).

vrátiť a posúdiť stabilitu svahu kdekoľvek, kde je dobrá reflektivita žiarenia vysielaného radarom so syntetickou clonou. Samozrejme pre kvalitnejšie posúdenie je lepšie použiť náročnejšie algoritmy s dlhšou časovou základňou ako PS-InSAR, ale z toho vyplýva nevýhoda, že odrazové body nemusia byť k dispozícii práve tam, kde chceme stabilitu posudzovať. V porovnaní s GNSS monitoringom, je výsledná veľkosť pohybu metódou InSAR charakterizovaná len vzhľadom na smer snímania zemského povrchu, pričom pri GPS monitoringu je možné stanoviť veľkosť a vývoj pohybu v rovine a v priestore v rámci monitorovaných etáp (BUŠA 2015).

Podľa VAN DER KOOIJ (1999) je metóda PS-InSAR efektívna a použiteľná metóda pre monitorovanie nestabilných území, najmä ak ide o urbanizovanú oblasť, kde množstvo odrazových bodov PS je dostatočné pre zhodnotenie pohybovej aktivity územia. Taktiež podľa autorov GREIF a VLČKO (2012), ktorí danú metódu aplikovali pri posúdení pohybovej aktivity zosuvu v Ľubietovej a pre ktoré je použitie metódy obmedzené množstvom odrazových bodov, ktoré sa vzťahujú najmä na osídlené oblasti a skalné masívy, kde je intenzita žiarenia väčšia ako vo vidieckych oblastiach s nižšou zástavbou. Hlavnú príčinu dekorelácie radarového signálu označili ako vplyv vegetácie, lúk a pri monitorovaní svahov najmä sklon svahu, ktorý bráni následnej analýze dát. Ale i napriek tomu, sa autorom do určitej miery podarilo zhodnotiť aktivitu zosuvu a korigovať ju s dátami z GPS monitoringu. Do určitej miery sklon svahu obmedzuje extrakciu dát a použitie metódy PS-InSAR aj podľa kolektívu autorov CASCINI et al. (2010).

V súčasnosti prebieha monitorovanie oblasti Bratislavy metódou InSAR, ktoré nadväzuje na diplomovú prácu BAKOŇ (2012) z Katedry geodetických základov STU v Bratislave, v ktorej sa autor venuje stabilitnému posúdeniu v oblasti Bratislavy. Následne v roku 2017 indikovali pohybovú aktivitu skalného masívu pri Devínskej ceste, ktorá je momentálne uzavretá v jednom smere z dôvodu prebiehajúceho inžinierskogeologického prieskumu, ktorý vyústi sanačnými opatreniami pre stabilizáciu skalného masívu. BAKOŇ et al. (2015) aplikoval metódu InSAR na zosuve v Nižnej Myšli, ktorá bola postihnutá rozsiahlymi zosuvmi z dôvodu extrémnych zrážok v roku 2010 a časť obce bola zničená.

V Česku, LAZECKÝ (2011) vo svojej dizertačnej práci opisuje proces subsidencie v Moravsko-Sliezskom regióne Ostravsko-Karvinskej oblasti zachytený na radarových snímkach z

misie Alos Palsar, ktorá pracuje vo frekvenčnom pásme L. Výhodou je schopnosť preniknúť cez vegetáciu, pričom si zachováva vysokú koreláciu oproti radarom pracujúcich v C pásme. Pre rozsiahlu ťažobnú činnosť je Ostravsko-Karvinská oblasť riedko osídlená. Pomocou InSARu sa podarilo autorovi zachytiť zóny s prejavom subsidencie, čo môže mať pozitívny vplyv pri následnom osídľovaní celej oblasti. V oblasti Českého Stredohoří KADLECÍK et al. (2016) uplatnili dva prístupy pre zhodnotenie zosuvov pôdy v oblasti neovulkanitov. V prvom prístupe pomocou multi-temporálnych techník InSAR (PS; SBAS; QUASI-PS) popisujú oblasť niekoľkých stoviek štvorcových kilometrov pre získanie priestorovo-časového rozloženia aktívnych zosuvov. V druhom postupe sa zameriavajú len na vybrané lokality s vhodnými dátumami vzniku zosuvov za použitia SAR snímkov z rôznych frekvenčných pásiem X;C, alebo L. Pomocou voľne dostupných radarových snímkov zo satelitu Sentinel-1A LAZECKÝ et al. (2016), ktoré použili pre detekciu zosuvov pôdy na rôznych lokalitách (Babadag-Turecko, Prievidza-Slovensko, Zosuv na Sarez lake-Tadžikistan, Taškent-Turecko), ktoré sú obmedzené frekvenčným pásmom C. Tieto radarové snímky neposkytujú dostačujúcu penetráciu cez vegetáciu, ale zase na druhej strane po opakujúcom 12 dňovom cykle umožňujú pomocou doplnkových monitorovacích metód svahových pohybov lepšie pochopenie nestabilných oblastí za pomerne nízke finančné náklady (LAZECKÝ et al. 2016). Od druhej polovice roka 2016 je na obežnej dráhe i satelit SENTINEL-1B, ktorý spolu so SENTINEL-1A tvoria konštaláciu, pri ktorej sa cyklus zosnímania toho istého územia skrátil na 6 dní, čo výrazne zvýši mieru včasného zachytenia aktivizácie svahovej deformácie.

V súčasnosti na Slovensku je niekoľko vhodných lokalít pre aplikovanie danej monitorovacej techniky v urbanizovaných oblastiach, kde by zástavba poskytla dostatočné množstvo odrazových bodov PS pre následne zhodnotenie pohybovej aktivity. Jedna významná oblasť je sídlisko Dargovských hrdinov v Košiciach, ktoré je celé vybudované na zosuvnom území a stabilitu územia zabezpečuje 202 horizontálnych odvodňovacích vrtov, ktorých funkčnosť je neustále monitorovaná a sieť geodetických monitorovacích bodov, ktoré sa pravidelne monitorujú, čo je náročné z časového a finančného hľadiska (KUKUČKA et al. 2011). Pri aplikovaní techniky PS-InSAR by sa výrazne rozšírila monitorovacia sieť v dôsledku hustej zástavby a získal by sa detailnejší pohľad aj na také miesta sídliska, ktoré nie sú zahrnuté v GNSS monito-

rovacej siete, čo by výrazne zlepšilo bezpečnosť celej oblasti.

Veľký potenciál predstavujú metódy ako Quasi-PS (QPS) (PERISSIN et al. 2007) a Squ-e-eSAR (FERRETTI et al. 2011), ktoré v konečnom dôsledku sú prezentované hustejším mračnom odrazových bodov, ako je to pri metóde PS InSAR. Tieto metódy by do určitej miery dopomohli k pochopeniu svahových deformácií s hustou vegetáciou, kde vyslaný signál z radaru neprechádza cez vegetáciu.

Metóda InSAR je komplexná metóda, pri aplikovaní ktorej sú potrebné skúsenosti a znalosti, aby sa dospelo k relevantným výsledkom. Všetky lokality sú svojim spôsobom jedinečné, výber vhodného algoritmu, alebo radarovej snímky je na mieste. Vzhľadom na všetky nevýhody a výhody spomínané v tomto príspevku je možné zhodnotiť, že metóda InSAR je v dnešnej dobe extrémne sa rozvíjajúca metóda, ktorú je možné využiť pri monitorovaní urbanizovaných oblastí, skalných masívov a v neposlednej rade aj samotných zosuvov. Hlavnou výhodou je jej operatívne využitie kdekoľvek, kde nám to samotná metóda umožňuje a spätne analyzovať vývoj nestability územia a účinne zasiahnuť, buď to preventívnymi opatreniami, alebo doplnením monitoringu o inú metódu.

ZÁVER

V prezentovanom príspevku sme popísali základnú problematiku a terminológiu svahových deformácií a rôznych metód monitorovania svahových pohybov, ako aj základnú charakteristiku, od histórie až po súčasnosť pomerne mladej, v súčasnej dobe intenzívne sa rozvíjajúcej metódy diaľkového prieskumu Zeme – InSAR, ktorej základom je družica obiehajúca okolo Zeme s radarom so syntetickou clonou. Problematika svahových deformácií na území Slovenska je aktuálna a rozšírenie databázy rôznych metód monitoringu svahových deformácií o diaľkový prieskum Zeme v súčasnej dobe je na mieste. Množstvo publikovaných prác vo vedeckej spoločnosti je dôkazom, že metóda radarovej satelitnej interferometrie InSAR a jej zložitejších algoritmov PS-InSAR je dostatočne pripravená k aplikovaniu i do praktickej sféry aj na území Slovenska, hlavne v zastavaných urbanizovaných oblastiach, ktoré sú ohrozované svahovými deformáciami. V súčasnej dobe, na základe popísanej problematiky smer výskumu je podporený najmä voľne dostupnými radarovými snímkami z misie Sentinel-1a) a b), ktoré pri znalostiach aplikovania dostupných algoritmov odrazových bodov PS a SBAS by mohli

pomôcť inžinierskym geológom pri posúdení aktivity zosuvov po kombinácii so zaužívanou metódou monitorovania. Hlavná výhoda InSARu vychádza z archívu radarových snímkov celého územia Slovenska, pričom je možnosť spätneho posúdenia aktivity pred samotným riešením monitoringu zosuvu zaužívanými metódami. V nasledujúcom výskume sa budeme venovať posúdeniu kvality a kvantity stálych odrazových bodov PS, vzniknutých z radarových snímkov z misie Sentinel-1a) a b), ktoré budú porovnávané s databázou registrovaných zosuvov v Košickej kotline. Záverom uvedeného výskumu, by nám malo byť jasné, do akej miery sa bude dať aplikovať metóda radarovej satelitnej interferometrie pri monitorovaní svahových deformácií na území Košickej kotliny, pričom získané výsledky sa budú verifikovať s medzinárodnými vedeckými prácami.

POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol vďaka podpore projektov VEGA 1/0722/15, APVV-0129-12, APVV-14-0174.

LITERATÚRA

- ATTEMA, E., BARGELLINI, P., EDWARDS, P., LEVRINI, G., LOKAS, S., MOELLER, L., ROSICH-TELL, B., SECCHI, P., TORRES, R., DAVIDSON, M., SNOEIJ, P. (2007). Sentinel-1: The Radar Mission for GMES Operational Land and Sea Services. *ESA Bulletin*, 131, 10 – 17.
- BAKOŇ, M. (2010). *Možnosti využitia technológie InSARu na určenie digitálneho modelu reliéfu*. Bakalárska práca, Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita. Bratislava, Slovakia, 54 s.
- BAKOŇ, M. (2012). *Application of InSAR technology for ground stability monitoring*. Diplomová práca, Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita. Bratislava, Slovakia, 57 s.
- BAKOŇ, M., PAPČO, J., PERISSIN, D., LAZECKÝ, M., SOUSA, J. J., HLAVÁČOVÁ, I., BÁTOROVÁ, K., ONDREJKA, P., LIŠČÁK, P., PAUDITŠ, P., REAL, N. (2015). Monitoring of landslide activity in Slovakia territory using multi-temporal InSAR techniques. In Ouwehand, L., ed. *Proceedings of FRINGE'15: Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop (Frascati, Italy, 23–27 March 2015)*.

ESA Special Publication 731, European Space Agency.

BAMLER, R., HARTL, P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14, 4, R1 – R54.

BÁTOROVÁ, K. (2012). *Možnosti posúdenia stability vybraného územia pomocou radarovej satelitnej interferometrie*. Diplomová práca, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského, Bratislava, Slovakia, 93 s.

BONI, R., BORDONI, M., MEISINA, C., COLOMBO, A., LANTERI, L. (2017). Integration of Multi-sensor A-DInSAR Data for Landslide Inventory Update. In Mikoš, M., Tiwari, B., Yin, Y., Sassa, K., eds. *Advancing Culture of Living with Landslides – WLF 2017: Workshop on World Landslide Forum, Volume 2 Advances in Landslide Science (Ljubljana, Slovenia, 29 May – 2 June 2017)*. Springer, Cham, 133 – 142.

BOVENGA, F., NUTRICATO, R., REFICE, A., WASOWSKI, J. (2006). Application of multi-temporal differential interferometry to slope instability detection in urban/peri-urban areas. *Engineering Geology*, 88, 3 – 4, 218 – 239.

BŘEŽNÝ, M., PÁNEK, T. (2017). Deep-seated landslides affecting monoclinal flysch morphostructure: Evaluation of LiDAR-derived topography of the highest range of the Czech Carpathians. *Geomorphology*, 285, 44 – 57.

BUŠA, J. (2015). *Zhodnotenie aktivity zosuvu vo Sv. Antone na základe GPS monitoringu*. Diplomová práca, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského, Bratislava, Slovakia, 74 s.

CASCINI, L., FORNARO, G., PEDUTO, D. (2010). Advanced low- and fullresolution DInSAR map generation for slow-moving landslide analysis at different scales. *Engineering Geology*, 112, 1 – 4, 29 – 42.

CIGNA, F., BIANCHINI, S., CASAGLI, N. (2012). How to assess landslide activity and intensity with Persistent Scatterer Interferometry (PSI): the PSI-based matrix approach. *Landslides*, 10, 267 – 283.

COLESANTI, C., WASOWSKI, J. (2004). Satellite SAR interferometry for wide-area slope hazard detection and site-specific monitoring of slow landslides. In Lacerda, W. A., Ehrlich, M., Fontoura, S. A. B., Sayao, A. S. F., eds.

Landslides: Evaluation and Stabilization/ Glissement de Terrain: Evaluation et Stabilisation, Set of 2 Volumes: Proceedings of the Ninth International Symposium on Landslides (Rio de Janeiro, Brazil, 28 June – 2 July 2004). Taylor & Francis, vol. 1, 795 – 802.

COLESANTI, C., WASOWSKI, J. (2006). Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology*, 88, 3 – 4, 173 – 199.

COLESANTI, C., FERRETTI, A., PRATI, C., ROCCA, F. (2003). Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. *Engineering Geology*, 68, 1 – 2, 3 – 14.

COVELLO, F., BATTAZZA, F., COLETTA, A., BATTAGLIERE, M. L., BELLIFEMINE, V., CANDELA, L. (2010). One-day interferometry results with the COSMO-SkyMed constellation. *2010 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium - IGARSS: Proceedings (Honolulu, Hawaii, U.S.A., 25 – 30 July 2010)*. IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers, 4397 – 4400.

CROSETTO, M., MONSERRAT, O., HERREIRA, G. (2010). Urban Applications of Persistent Scatterer Interferometry. In Soergel, U., ed. *Radar Remote Sensing of Urban Areas (Remote sensing and digital image processing series, vol 15)*. Springer, Dordrecht, 233 – 248.

CROSETTO, M., MONSERRAT, O., CUEVAS-GONZALEZ, M., DEVANTHERY, N., CRIPPA, B. (2016) Persistent Scatterer Interferometry: A review, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 78 – 89.

ČAPKOVÁ, I., KIANIČKA, J., HALOUNOVÁ, L. (2006). Detection of subsidences and landslides in the North-Bohemian coal basin by the InSAR method. *Fringe ATSR Workshop 2005 (Frascati, Italy, 28 November – 2 December 2005)*. ESA Special Publication 610, European Space Agency.

DLR (2009). *TerraSAR-X - Germany's radar eye in space*. <http://www.dlr.de/eo/en/DesktopDefault.aspx?tabid=5725/9296_read-15979/gallery%201/gallery_read-Image.1.1>. On-line [August 7th 2009].

DRDOŠ, J. (1992). Prírodné prostredie: zdroje – potenciály – únosnosť – hazardy – riziká. *Geografický časopis*, 44, 1, 30 – 39.

- DUCHOSSOIS, G., MARTIN, P. (1995). ERS-1 and ERS-2 Tandem Operations. *ESA Bulletin*, 83, 54 – 60.
- ESA (2016). <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>>. On-line [September 21st 2017].
- FARINA, P., COLOMBO, D., FUMAGALLI, A., MARKS, F., MORETTI, S. (2006). Permanent Scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project. *Engineering Geology*, 88, 3 – 4, 200 – 217.
- FATTAHI, H. (2015). *Geodetic Imaging of Tectonic Deformation with InSAR*. PhD thesis, University of Miami, U.S.A., 139 p.
- FERRETTI, A., PRATI, C., ROCCA, F. (1999). Multibaseline InSAR DEM reconstruction: the wavelet approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37, 2, 1, 705 – 715.
- FERRETTI, A., PRATI, C., ROCCA, F. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38, 5, 1, 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.
- FERRETTI, A., NOVALI, F., BÜRGMANN, R., HILLEY, G., PRATI, C. (2004). InSAR permanent scatterer analysis reveals ups and downs in San Francisco Bay Area. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 85, 34, 317 – 324.
- FERRETTI, A., MONTI-GUARNIERI, A., PRATI, C., ROCCA, F., MASSONNET, D. (2007). *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. ESA Publications, TM-19, European Space Agency.
- FERRETTI, A., FUMAGALLI, A., NOVALI, F., PRATI, C., ROCCA, F., RUCCI, A. (2011). A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49, 9, 3460 – 3470.
- FRUNEAU, B., ACHACHE, J., DELACOURT, C. (1996). Observation and modelling of the Saint-Étienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry. *Tectonophysics*, 265, 3 – 4, 181 – 190.
- GABRIEL, A. K., GOLDSTEIN, R. M., ZEBKER, H. A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94, B7, 9183 – 9191.
- GILI, J. A., COROMINAS, J., RIUS, J. (2000). Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring. *Engineering Geology*, 55, 3, 167 – 192.
- GOTTWALD, M., FRITZ, T., BREIT, H., SCHÄTTLER, B., HARRIS, A. (2017). Remote sensing of terrestrial impact craters: The TANDDEM-X digital elevation model. *Meteoritics & Planetary Science*, 52, 7, 1412 – 1427.
- GREIF, V., VLČKO, J. (2012). Monitoring of post-failure landslide deformation by the PS-InSAR technique at Lubietova in Central Slovakia. *Environmental Earth Sciences*, 66, 6, 1585 – 1595.
- GUNTER'S SPACE PAGE (2017). *COSMO 1*, 2, 3, 4. <http://space.skyrocket.de/doc_sdat/cosmo-skymed-1.htm>. On-line [July 13th 2017].
- HANSSEN, R. F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Springer - Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 328 p.
- HERRERA, G., DAVALILLO, J. C., MULAS, J., COOKSLEY, G., MONSERRAT, O., PANCIOLI, V. (2009). Mapping and monitoring geomorphological processes in mountainous areas using PSI data: Central Pyrenees case study. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 5, 1587 – 1598.
- HILLEY, G. E., BÜRGMANN, R., FERRETTI, A., NOVALI, F., ROCCA, F. (2004). Dynamics of Slow-Moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis. *Science*, 304, 5679, 1952 – 1955.
- HLAVÁČOVÁ, I., KOLOMAZNÍK, J., LAZECKÝ, M. (2016). Monitoring Bridge Deformation in the Czech Republic with Sentinel-1 data. In Ouwehand, L., ed. *Living Planet Symposium, Proceedings (Prague, Czech Republic, 9 – 13 May 2016)*. ESA Special Publication 740, European Space Agency, p. 306.
- HOOPER, A. (2006). *Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation*. PhD thesis, The Department of Geophysics, Stanford University, California, U.S.A.

- HRAŠNA, M. (1998). Geologické prostredie a geofaktory životného prostredia – nové pojmy geologických vied. In Wagner, P., ed. *Zborník referátov z 1. konferencie geológia a životné prostredie (Bratislava, 25. – 26. november 1998)*. Vydavateľstvo D. Štúra, Geologická služba SR, Bratislava, 121 – 123.
- CHUWA, L. (2006). *Vyhodnocení chyb v začátku měření radarových dat pro interferometrii*. Diplomová práce, České vysoké učení technické v Praze.
- KADLEČÍK, P., LAZECKÝ, M., NICO, G., MASCHOLO, L., BALEK, J., MAREK, T. (2016). Monitoring of Landslide Activity by Synergic Use of X-Band and L-Band InSAR in the Ceske Stredohori Mts., Czech Republic. In Ouwehand, L., ed. *Living Planet Symposium, Proceedings (Prague, Czech Republic, 9 – 13 May 2016)*. ESA Special Publication 740, European Space Agency, p. 310.
- KAMIYAMA, J., KUNITOMO, M., SAKAGAMI, M., HIRATA, I., YOSHIKAWA, K., NISCHIKAWA, D. (2017). Method of Estimating Slope Movement Area Using DInSAR Analysis. In Mikoš, M., Tiwari, B., Yin, Y., Sassa, K., eds. *Advancing Culture of Living with Landslides – WLF 2017: Workshop on World Landslide Forum, Volume 2 Advances in Landslide Science (Ljubljana, Slovenia, 29 May – 2 June 2017)*. Springer, Cham, 237 – 247.
- KIM, J., KIM, D., KIM, S., WON, J., MOON, W. M. (2007). Monitoring of urban land surface subsidence using PSInSAR. *Geosciences Journal*, 11, 1, 59 – 73.
- KOPECKÝ, M., MARTINČEKOVÁ, T., ŠIMEKOVÁ, J., ONDRAŠIK, M. (2008). Atlas zosuvov – výsledky riešenia geologickej úlohy. In Wagner, P., ed. *Geológia a životné prostredie : Zborník vedeckých prác zo 6. slovenskej konferencie s medzinárodnou účasťou (Bratislava, 18. – 19. september 2008)*. Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava, 105 – 110.
- KRIEGER, G., MOREIRA, A., FIEDLER, H., HAJNSEK, I., WERNER, M., YOUNIS, M., ZINK, M. (2007). TanDEM-X: A Satellite Formation for High-Resolution SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45, 11, 3317 – 3341.
- KUKUČKA, P., LABANT, S., WEISS, G. (2011). The use of global navigation satellite systems for deformation analysis of the Dargovských hrdinov housing estate. *Acta Montanistica Slovaca*, 16, 4, 319 – 327.
- LAUKNES, T. R., SHANKER, P., ZEBKER, A. H., LARSEN, Y. (2008). A combined small baseline and persistent scatterer InSAR method for resolving land deformation in natural terrain. *33rd International Geological Congress (Oslo, Norway, 6 – 14 August 2008)*.
- LAZECKÝ, M. (2011). *Monitoring of Terrain Relief Changes using Synthetic Aperture Radar Interferometry*. PhD thesis, The Institute of Geoinformatics, Technical University of Ostrava. Czech republic. 176 p.
- LAZECKÝ, M., CANASLAN COMUT, F., NIKOLAEVA, E., BAKOŇ, M., PAPČO, J., RUIZ-ARMENTEROS, A. M., QIN, Y., DE SOUSA, J. J. M., ONDREJKA, P. (2016). Potential of Sentinel-1A for nation-wide routine updates of active landslide maps. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, ISPRS Archives, 41, B7 (Halounova, L., Sunar, F., Potůčková, M., Patková, L., Yoshimura, M., Soergel, U., Ben-Dor, E., Smit, J., Bareth, G., Zhang, J., Kaasalainen, S., Sörgel, U., Osmanoglu, B., Crespi, M., Crosetto, M., Blaschke, T., Brovelli, M. A., Zagajewski, B., eds. XXIII ISPRS Congress, Commission VII, Prague, Czech Republic, 12 – 19 July 2016), 775 – 781.
- LAZECKÝ, M., JIRÁNKOVÁ, E., KADLEČÍK, P. (2017). Multitemporal monitoring of Karvina subsidence trough using Sentinel-1 and TerraSar-X interferometry. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 14, 1 (185), 53 – 59.
- LI, F., GOLDSTEIN, R. (1987). Studies of multi-baseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars. *IGARSS '87 - International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Ann Arbor, MI, U.S.A., 18 – 21 May 1987)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1545 – 1550.
- LIŠČÁK, P., PAUDITŠ, P., PETRO, Ľ., IGLÁROVÁ, Ľ., ONDREJKA, P., DANANAJ, I., BRČEK, M., BARÁTH, I., VLAČIKY, M., NÉMETH, Z., ZÁHOROVÁ, Ľ., ANTALÍK, M., REPČIAK, M., DROTÁR, D. (2010). Registration and evaluation of newly evolved slope failures in Prešov and Košice regions in 2010. *Mineralia Slovaca*, 42, 4, 393 – 406.
- LU, P., CATANI, F., TOFANI, V., CASAGLI, N. (2014). Quantitative hazard and risk as-

- assessment for slow-moving landslides from Persistent Scatterer Interferometry. *Landslides*, 11, 4, 685 – 696.
- MADSEN, S. N., CHRISTENSEN, E. L., SKOU, N., DALL, J. (1991). The Danish SAR system: design and initial tests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29, 3, 417 – 426.
- MALGOT, J., BALIAK, F. (1997). Interakcia stavebnej činnosti a zosuvných území na Slovensku. *Interakcia stavieb a horninového prostredia: Zborník referátov z 3. geotechnickej konferencie*. Slovenská technická univerzita, Bratislava, 289 – 294.
- MASSONNET, D., ADRAGNA, F. (1993). A full-scale validation of radar interferometry with ERS-1: the Landers earthquake. *Earth Observation Quarterly*, 41, 1 – 5.
- 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, 6433, 138 – 142.
- MATULA, J. (1995). *Geológia v územnom plánovaní a výstavbe*. Príroda a. s., Bratislava.
- MATULA, J., ONDRÁŠIK, R. (1990). Inžinierska geológia v ochrane a tvorbe životného prostredia. *Mineralia Slovaca*, 22, 5, 385 – 392.
- MINÁR, J., TREMBOŠ, P. (1994). Prírodné hazardy – hrozby, niektoré postupy ich hodnotenia. *Acta Facultatis Rerum Naturalium Universitatis Comenianae, Geographica*, 35, 175 – 194.
- NEMČOK, A. (1982). *Zosuvy v Slovenských Karpatoch*. Veda, Bratislava, 320 s.
- NG, A. H.-M., GE, L. (2007). Application of persistent scatterer InSAR and GIS for urban subsidence monitoring. *2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS: Proceedings (Barcelona, Spain, 23 – 27 July 2007)*. IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1091 – 1094.
- NOTTI, D., HERRERA, G., BIANCHINI, S., MEISINA, C., GARCÍA-DAVALILLO, J. C., ZUCCA, F. (2014). A methodology for improving landslide PSI data analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 35, 6, 2186 – 2214.
- NOTTI, D., CALÒ, F., CIGNA, F., MANUNTA, M., HERRERA, G., BERTI, M., MEISINA, C., TAPETE, D., ZUCCA, F. (2015). A User-Oriented Methodology for DInSAR Time Series Analysis and Interpretation: Landslides and Subsidence Case Studies. *Pure and Applied Geophysics*, 172, 11, 3081 – 3105.
- OLIVEIRA, S. C., ZÊZERE, J. L., CATALÃO, J., NICO, G. (2015). The contribution of PSInSAR interferometry to landslide hazard in weak rock-dominated areas. *Landslides*, 12, 4, 703 – 719.
- ONDRÁŠIK, R., GAJDOŠ, V. (2006). Geologické riziká a ich hodnotenie pri projektovej príprave a využívaní krajiny. *Acta Environmentalistica Universitatis Comenianae*, 14, 2, 83 – 99.
- ONRÁŠIK, R., RYBÁŘ, J. (1991). *Dynamická inžinierska geológia*. Slovenské pedagogické nakladateľstvo, Bratislava, 267 s.
- ONDRÁŠIK, R., GAJDOŠ, V., BÁNSKA, H. (1999). Hodnotenie environmentálnych rizík abiotickéj zložky v procese posudzovania vplyvov na životné prostredie. *Geografický časopis*, 51, 3, 313 – 326.
- ONDRÁŠIK, R., VLČKO, J., FENDEKOVÁ, M. (2011). *Geologické hazardy a ich prevencia*. Univerzita Komenského, Bratislava, 288 s.
- PARADELLA, W. R., FERRETTI, A., MURA, J. C., COLOMBO, D., GAMA, F. F., TAMBURINI, A., SANTOS, A. R., NOVALI, F., GALLO, M., CAMARGO, P. O., SILVA, A. Q., SILVA, G. G., SILVA, A., GOMES, L. L. (2015). Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis. *Engineering Geology*, 193, 61 – 78.
- PERISSIN, D., PRATI, C., ROCCA, F. (2007). ASAR Parallel-Track PS Analysis in Urban Sites. *2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS: Proceedings (Barcelona, Spain, 23 – 27 July 2007)*. IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1167 – 1170.
- PERISSIN, D., FERRETTI, A., PANTANIDA, R., PICCAGLI, D., PRATI, C., ROCCA, F., RUCCI, A., DE ZAN, F. (2008). Repeat-Pass SAR Interferometry with Partially Coherent Targets. In Lacoste, H., Ouwehand, L., eds. *Proceedings of FRINGE 2007 Workshop (Frascati, Italy, 26 – 30 November 2007)*. ESA Special Publication 649, European Space Agency.

- PERNA, S. (2010). Airborne DInSAR time series at X-Band. *2010 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium - IGARSS: Proceedings (Honolulu, Hawaii, U.S.A., 25 – 30 July 2010)*. IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2868 – 2871.
- PETRO, L., FRANKOVSKÁ, J., MATYS, M., WAGNER, P. (2008). *Inžinierskogeologický a geotechnický terminologický slovník*. Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava, 465 s.
- PETRÝDESOVÁ, L. (2012). *Hodnotenie zosuvného hazardu v modelovom území Hlohovec-Sereď*. PhD thesis. Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského, Bratislava, Slovakia, 224 s.
- PORZYCKA, S., LEŚNIAK, A. (2011). Analysis of trend changes of ground deformation in the selected mining areas in Dabrowski Coal Basin (South Poland). *2011 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium - IGARSS: Proceedings (Vancouver, British Columbia, Canada, 24 – 29 July 2011)*. IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2629 – 2632.
- RASPINI, F., CIAMPALINI, A., DEL CONTE, S., LOMBARDI, L., NOCENTINI, M., GIGLI, G., FERRETTI, A., CASAGLI, N. (2017). Mapping Rapid-Moving Landslide with Satellite SAR Images: The Case of Montescaglioso (South Italy). In Mikoš, M., Tiwari, B., Yin, Y., Sassa, K., eds. *Advancing Culture of Living with Landslides – WLF 2017: Workshop on World Landslide Forum, Volume 2 Advances in Landslide Science (Ljubljana, Slovenia, 29 May – 2 June 2017)*. Springer, Cham, 171 – 177.
- RASPINI, F., MORETTI, S., FUMAGALLI, A., RUCCI, A., NOVALI, F., FERRETTI, A., PRATI, C., CASAGLI, N. (2014). The COSMO-SkyMed Constellation Monitors the Costa Concordia Wreck. *Remote Sensing*, 6, 5, 3988 – 4002.
- RIGHINI, G., PANCIOLO, V., CASAGLI, N. (2012). Updating landslide inventory maps using Persistent Scatterer Interferometry (PSI). *International Journal of Remote Sensing*, 33, 7, 2068 – 2096.
- RICHARDS, J. A. (2009). *Remote Sensing with Imaging Radar*. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg.
- ROSEN, P. A., HENSLEY, S., JOUGHIN, I. R., LI, F. K., MADSEN, S. N., RODRIGUEZ, E., GOLDSTEIN, R. M. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88, 3, 333 – 382.
- ROSI, A., TOFANI, V., TANTERI, L., TACCONI STEFANELLI, C., AGOSTINI, A., CATANI, F., CASAGLI, N. (2017). The new landslide inventory of Tuscany (Italy) updated with PS-InSAR: geomorphological features and landslide distribution. *Landslides* (in Press). <<https://doi.org/10.1007/s10346-017-0861-4>>. On-line [July 17th 2017].
- ROTT, H., SCHEUCHL, B., SIEGEL, A., GRASEMANN, B. (1999). Monitoring very slow slope movements by means of SAR interferometry: A case study from a mass waste above a reservoir in the Ötztal Alps, Austria. *Geophysical Research Letters*, 26, 11, 1629 – 1632.
- SINGHROY, V., MATTAR, K. E., GRAY, A. L. (1998). Landslide characterisation in Canada using interferometric SAR and combined SAR and TM images. *Advances in Space Research*, 21, 3, 465 – 476.
- SKOLNIK, M. I. (1962). *Introduction to radar systems*. McGraw-Hill – Kogakusha, New York – Tokyo.
- SOERGEL, U., ed. (2010). *Radar Remote Sensing of Urban Areas*. Remote Sensing and Digital Image Processing, 15, Springer Science+Business Media B.V., Dordrecht, 278 p.
- UNAVCO (2015). *Synthetic Aperture Radar (SAR) Satellites*. <<https://www.unavco.org/instrumentation/geophysical/imaging/sar-satellites/sar-satellites.html>>. On-line [August 7th 2015].
- VAN DER KOOIJ, M. (1999). Engineering geology landslide investigations and SAR Interferometry. *FRINGE '99 Workshop: Advancing ERS SAR Interferometry from Applications towards Operations (Liège, Belgium, 10 – 12 November 1999)*. ESA Special Publication 478, European Space Agency.
- WAGNER, P. (2002). Monitorovanie zosuvov a iných svahových deformácií. *Geologické práce, Správy*, 106, 21 – 42.
- WAGNER, P., ONDREJKA, P., IGLÁROVÁ, L., FRAŠTIA, M. (2010). Aktuálne trendy v monitorovaní svahových pohybov. *Mineralia Slovaca*, 42, 2, 229 – 240.

WANG, X., WANG, G., GUAN, Y., CHEN, Q., GAO, L. (2005). Small satellite constellation for disaster monitoring in China. *2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS '05: Proceedings (Seoul, South Korea, 25 – 29 July 2005)*. IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers, vol. 1.

YAMAZAKI, D., IKESHIMA, D., TAWATARI, R., YAMAGUCHI, T., O'LOUGHLIN, F., NEAL, C. J., SAMPSON, C. C., KANAE, S., BATES, P. D. (2017). A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophysical Research Letters*, 44, 11, 5844 – 5853.

ZHANG, Y., PRINET, V. (2004). InSAR coherence estimation. *2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS 2004: Proceedings (Anchorage, AK, U.S.A., 20 – 24 September 2004)*. IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers, vol. 5, 3353 - 3355.