

VYUŽITÍ DRUŽICOVÉ RADAROVÉ INTERFEROMETRIE PRO MONITOROVÁNÍ POKLESŮ VLIVEM PODDOLOVÁNÍ

Abstract

An applicability of satellite synthetic aperture radar interferometry (InSAR) methods to perform a monitoring of a subsidence in the region of Ostrava-Karviná district in Czech Republic is investigated here. Cities in the region are affected by an intensive mining of a black coal for over 200 years. Character of the area, a velocity and spatial scale of the subsidence, are challenging the limits of InSAR. These limits are depicted, both for differential InSAR and multitemporal InSAR using C-band and L-band data in the region. While extents of subsidence troughs are often possible to delimitate, the deformation rates are usually underestimated. This was compared also to existing data from levelling. A strong potential can be seen in monitoring of slow deformations such as decay subsidence after a closure of mines. In Ostrava city, some subsidence of several mm/year was detected even 15 years after the closures in 1990s. In a conclusion, InSAR techniques were evaluated as appropriate for a systematic monitoring of subsidence in the region. It can be used as a complementary technique to levelling measurements.

Key words: InSAR, subsidence, coal mining, undermining, ERS, Envisat, Alos.

Souhrn

Techniky radarové interferometrie obsahují mnoho výpočetních úkonů nad daty, včetně různých filtrací, kterými je možno překonat některá omezení použitých dat. I tak je použitelnost InSAR v našich podmínkách poměrně sporná. V takzvaných dekorelujících oblastech (např. vegetační pokryv) nedosahují výsledky očekávaných kvalit. Aplikace na území Moravskoslezského kraje přinesla důležité poznatky o použitelnosti pro sledování tohoto území. Vzhledem k velké míře a rychlosti poklesů nebyly tyto většinou správně vyhodnoceny pomocí družicových systémů ERS a Envisat, které pracují ve frekvenčním pásmu C (vlna délky 5.6 cm). Touto technologií nelze zcela nahradit nivelační a jiná měření v terénu. I tak zůstává technologie velmi vhodná pro své unikátní možnosti vyhodnotit plochu území postiženého poklesy a soustavně sledovat vývoj poklesů časově i místně. Použitím vhodnějších dat se předpokládají lepší výsledky, jak je zde demonstrováno v kombinaci dvou snímků z radaru Alos Palsar, pracujícím ve frekvenčním pásmu L (vlna délky 23.6 cm).

Úvod

Hornická činnost při dobývání vysoce kvalitního černého uhlí na Ostravsku a Karvinsku má přes 200 let dlouhou historii, která je protkána velkým počtem problémů vzniklých touto činností, ať už se týkají jednotlivých závalů, výronu metanu či poklesů, které způsobují vážná poškození budov a jiných struktur i dnes. Prostřednictvím družicové radarové interferometrie je možno identifikovat klesající území a vyhodnotit míru poklesů o přesnosti teoreticky lepší než jeden milimetr, aniž by bylo potřeba postižené území přímo navštívit kvůli měření.

Mocnost slojí v Ostravsko-karvinském revíru (OKR) se pohybuje v rozmezí 0,6-1,8 m na Ostravsku, mocnější sloje o 1,2-6 m se nalézají na Karvinsku. Každým rokem je vytěženo okolo 11 mil. tun černého uhlí. V 90-tých letech 20. století byly ostravské doly postupně uzavřeny. Protože se na Karvinsku většinou dobývá metodou směrného stěnování bez zakládání vydobytých prostor, dochází nad dobývacími prostory a v jejich okolí ke vzniku často poměrně hlubokých poklesových kotlin. To zapříčiňuje významnou členitost terénu, tvorby bezodtokových oblastí i přímo v osídleném území a postupná poškozování mnoha vystavěných objektů, která mnohdy vedou až k jejich úplné destrukci (Martinec et al., 2004).

Horninový masiv se stabilizuje po dobu několika let – vzhledem k často velké hloubce dobývání, která přesahuje 1 km pod povrchem může vliv dobývání na terén doznívat i přes 5 let (Dopita et al., 1997). Z nivelačních měření poklesové kotliny v okolí Stonavy (Jiránková, 2006) byly zjištěny poklesy větší než 1 m/rok (2009-2010).

Materiál a metody

Principem technik družicové radarové interferometrie (InSAR) pro sledování změn reliéfu terénu je vytvoření takzvaného interferogramu a jeho případná další zpracování. Ten vzniká ze dvou družicových radarových (SAR) snímků určitého území vytvořených s vhodným časovým odstupem a z mírně odlišné polohy družic při snímání, jako rozdíl fázové složky vyslaného a přijatého radarového signálu o určité mikrovlnné délce. Existuje několik družic s různou konfigurací a vlastnostmi - zde byly použity snímky z ERS, Envisat a Alos Palsar.

Radarovými odražeči jsou objekty alespoň srovnatelné s vlnovou délkou signálu; stejně tak na vlnové délce závisí i schopnost detekce terénní změny - v jedné buňce rozlišení je

možno detekovat změnu o velikosti poloviny vlnové délky. Proto je často pro sledování značných změn terénu vhodné použít SAR pracující s delšími vlnami, tedy je preferován Alos Palsar o vlně délky 23.6 cm, která navíc prochází i vegetací. V zastavěných oblastech, kde vegetace nečiní problémy anebo je zapotřebí detekovat velmi malé změny (v přesnosti lepší než 1 mm), se doporučuje použití radarů pracujících ve frekvenčním pásmu X, například TerraSAR-X o vlnové délce 3.11 cm a velmi vysokém rozlišení kolem 1 m. Obecně se používají data družic o vlnové délce v radiovém pásmu C, například ERS či Envisat vysílající vlny délky 5.6 cm.

Družicová radarová interferometrie se prakticky používá od 90. let 20. století k tvorbě digitálních modelů terénu, pro sledování poklesů, sesuvů, ledovcových pohybů, vulkanické činnosti, projevů zemětřesení aj. (Hanssen, 2001). Použití je často problematické, neboť se potýká se specifickými problémy, jako je pro účely sledování poklesů především nepříznivý vliv atmosféry či rušivý odraz z pohybujících se objektů, například vegetace. Dnes existuje několik pokročilých metod. Zde byly použity metody diferenční radarové interferometrie (DInSAR) pomocí open-source procesoru Doris (Kampes et al., 2003) a multitemporální/vícesnímkové metody (MT-InSAR), jako je Persistent Scatterers Interferometry (PSI) či Small Baselines Interferometry (SBI), obě implementovány v sadě algoritmů StaMPS (Hooper, 2008).

Metoda DInSAR se zaměřuje na zjištění fázových změn odražené vlny mezi dvěma snímky s určitým časovým odstupem, pro celou snímanou scénu. Pokouší se o filtrování veškerých nepotřebných složek (jako je vliv topografie, zakřivení Země, systematické chyby, šum a v případě existence vhodných dat i vliv zpoždění signálu atmosférou). Výsledný obraz interferogramu zachycuje terénní změny jako rozdíl hodnot fáze vlny mezi pixely, deformace tak tvoří takzvané pruhy "fringe", kde každý pruh lze interpretovat jako deformaci o polovině vlnové délky ve směru k družici či od ní. Pro zhodnocení celkové deformace pro jednotlivé pixely je nutné použít některou z metod rozbalení fáze. Jejich úspěch závisí především na celkové koherenci interferogramu. Šum a jiné chyby se v tomto procesu projeví silně negativně. Vzhledem k často vysoké dekorelaci mezi snímky nebylo možné tyto metody použít při této práci.

Metody MT-InSAR využívají celé sady interferogramů DInSAR z mnoha SAR snímků, ze kterých jen (obecně řečeno) vysoce korelující body jsou použity pro identifikaci deformačních pohybů v dlouhém časovém období. U těchto bodů je možné vyhodnotit deformace v přesnosti často lepší než je 1 mm/rok. Navíc, zpracováním více radarových snímků v řadě je možné minimalizovat vliv některých zdrojů chyb v DInSAR, jako jsou chyby v DEM, orbitech, dekorelující pixely či vliv atmosféry a rovněž je v těchto bodech možné spolehlivé rozbalení fáze (pokud deformace příliš nepřekročila detekční limity dat). Oproti metodě PSI, která vyhledává pixely PS obsahující nějaký dominantní odražeč, metoda SBI vybírá pixely, jejichž fáze dekoreluje jen pomalu v celé datové sadě. Tím je tato metoda výhodná v místech bez dominantních odražečů, například mimo urbanizované oblasti. Aby se zvýšila korelace jednotlivých diferenčních interferogramů, kombinuje metoda SBI všechny snímky mezi sebou, bez potřeby společného "master" snímku, jak je tomu u metody PSI.

Pro svou práci jsem získal v rámci projektu ESA C1P.4578 k dispozici celkem 143 snímků ERS-1 a ERS-2 (z toho 6 tandemových párů s jednodenním odstupem), 45 snímků Envisat a 7 snímků Alos Palsar. Interferogramy DInSAR byly filtrovány pokročilými metodami – modifikovaným filtrem Goldstein (Baran et al., 2003) a modifikovaným filtrem Non-local mean (Deledalle et al., 2010).

Výsledky

Vzhledem k citlivosti radarů ERS a Envisat na různé dekorelační faktory bylo možno úspěšně vyhodnotit jen několik málo DInSAR interferogramů. Na Obr. 1 vlevo je uveden interferogram ERS-2 z období 35 dnů v roce 1998, ze kterého je možno snadno identifikovat jednotlivé poklesové kotliny poblíž dolů na Karvinsku. Tento interferogram byl získán v období mezi zimou a jarem, bez aktivní vegetace a pravděpodobně bez sněhové pokrývky (jak bylo konzultováno s daty z ČHMÚ platné pro stanici Ostrava-Mošnov, přibližně 30 km od zkoumaného území). Společně s podobnou geometrickou konfigurací družic při pořizování obou snímků tak byla v interferogramu zachována dostatečně vysoká koherence po celém území. Na pravé straně Obr. 1 je uveden diferenční interferogram stejného území z Alos Palsar z roku 2008, s odstupem 46 dnů. Tento senzor není tak citlivý na velmi malé změny a fáze vlny není příliš ovlivněna pohyby drobných objektů, jako jsou listy na stromech. Výsledný interferogram demonstruje vhodné použití Alos Palsar, bohužel jen velmi málo snímků existuje pro zkoumané území.

Oblast v okolí Stonavy je pravidelně zkoumaná nivelačním měřením. Měřená lokalita je zvýrazněna obdélníkem na Obr. 2, který je přiblížením obou interferogramů z Obr. 1. Zde je již patrný vliv rozlišení. V období interferogramů byl pokles na tomto území velmi pozvolný. Oproti tomu, poklesová kotlina v západní části interferogramů ukazuje velmi rychlý pokles. Ten může být při rozlišení 25 m a vlnové délce 5.6 cm u ERS-2 v Obr. 2a podhodnocen, je možné jej zhruba interpretovat jako pokles o velikosti cca 15 cm/35 dnů v LOS začátkem roku 1998. Přesnější Alos Palsar o rozlišení cca 10 m a vlnové délce 23.6 cm na Obr. 2b detekuje pokles o velikosti až okolo 70 cm/46 dnů v LOS začátkem roku 2008. Artefakt je v oblasti Křivého Dolu zasaženého vlivy činnosti Dolu Darkov. Území je rekultivováno.

Kromě těchto dvou uvedených interferogramů je možno demonstrovat výsledky DInSAR i dalších zpracovaných dat sledující poklesy či jiné terénní deformace. V oblastech pokrytých vegetací a/nebo s poklesy o spádu přesahujícím 3 mm/m v LOS během 35 dnů (Hanssen, 2001) je však použití dat ERS/Envisat obtížné, data dekorelují.

Výsledek ze zpracování MT-InSAR na území Ostravy je předveden na Obr. 3. Jedná se o kombinovaný výsledek zpracování PSI+SBI pro dvě různá období. V urbanizované oblasti Ostravy byl ve více než 20 interferogramech v obou případech nalezen dostatečný počet stabilně odrážejících bodů, díky čemuž bylo možno kvalitně odhadnout a filtrovat nepotřebné složky signálu (atmosféra aj.). Body reprezentující střední rychlost deformací ve směru LOS byly dále interpolovány metodou inverzních vzdáleností (IDW) pro zajištění vhodnějšího výstupu pro vizualizaci. Ve výsledku z období 1995-1999 (Obr. 3a) je možné interpretovat poklesy v okolí již uzavřených dolů, přičemž poklesy u aktivního Dolu Paskov mají mnohem vyšší míru, která byla možná ve zpracování podhodnocena na míru do 3 cm/rok v LOS (bylo zjištěno, že jen rychlost poklesů v prvních centimetrech za rok je možné správně vyhodnotit z ERS/Envisat pomocí MT-InSAR na tomto území, to je ostatně možno vyzorovat i z grafů uvedených na Obr. 4). Oproti tomu, výsledek z období 2003-2010 na Obr. 3b ukazuje poměrnou stabilitu území, asi 10 a více let po ukončení většiny dolů (většina ostravských dolů byla uzavřena do 1994). I tak je zde však několik míst relativně blízko již neaktivních dolů, které klesají v rychlosti několika milimetrů za rok i 15 let po ukončení těžby (například okolí dolu Ludvík či železniční dráha na S od dolu Heřmanice).

Diskuze

Družicová radarová interferometrie je poměrně novým vědeckým oborem, který se plně

rozvinul do aplikační sféry až během posledních 10 let. Kvalita interferometrických výsledků je závislá především na parametrech družicových dat – jako v každém oboru, i zde se přístroje neustále zdokonalují. Výsledky z vícesnímkového zpracování ERS/Envisat obvykle podhodnocují pravou míru poklesu, která dle nivelačních měření na mnoha místech v OKR znatelně převyšují detekční limity družicových radarů. Použitím jiných dat mohou výsledky dosáhnout mnohem vyšších kvalit – vzhledem k cenové dostupnosti jiných dat však tyto nebyly řádně prozkoumány. Významnou vizí do budoucna se jeví nasazení družice Sentinel-1, která by měla od roku 2012 dodávat data v pásmu C o periodicitě 12 dnů s rozlišením až 5 m. Taková konfigurace by měla zaručovat použitelnost i v obtížnějších podmínkách, jaké se projevují i v OKR.

Jiným velmi vhodným zdrojem dat je družice Alos, která využívá delších vln v pásmu L. Ty jsou velmi vhodné pro použití v územích pokrytých středně hustou vegetací, kterou taková vlna prochází, a pro monitorování hlubokých poklesů, které jsou lépe zachyceny v rámci vlnové délky. To bylo potvrzeno i zde zpracováním několika dostupných snímků.

Závěr

Tato přednáška představuje základní principy družicové radarové interferometrie a seznamuje s původními výsledky ze sledování poklesů na poddolovaném území Moravskoslezského kraje.

Ve zkoumaném území se projevují rychlé poklesy, které mohou přesáhnout míru 1 m/rok v poměrně malé ploše (o průměru stovek metrů). Takové poklesy není možno korektně vyhodnotit pomocí družic ERS či Envisat, použití jejich dat je proto omezeno pouze na detekci těchto poklesů, například pro zjištění hranic poklesové kotliny. Tato data se však jeví velmi vhodná pro sledování doznívajících poklesů po ukončení hornické činnosti, nejlépe pomocí vícesnímkových technik InSAR, kde je možné přesně vyhodnotit poklesy o rychlosti prvních centimetrů za rok; teoretická spodní hranice se udává až méně než 1 milimetr za rok. Tak byly zjištěny velmi malé lokální zbytkové poklesy na území Ostravy až více než 15 let po ukončení těžby tamějších dolů pomocí implementace ve StaMPS.

Přehled literatury

Baran, I., Stewart, M. P., Kampes, B. M., Perski, Z., Lilly, P. "A Modification to the Goldstein Radar Interferogram Filter". In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'03. Vol. 41. 9. Toulouse: IEEE International, 2003, pp. 2114–2118.

Deledalle, Ch. A., Tupin, F., Denis, L. "A non-local approach for SAR and interferometric SAR denoising". In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'10. Honolulu: IEEE International, 2010. ISBN: 978-1-4244-9564-1.

Dopita, M., Aust, J., et al. Geologie české části hornoslezské pánve. MŽP ČR, Praha, 1997, s. 280. ISBN: 80-7121-011-5.

Hanssen, R. F. Radar interferometry: data interpretation and error analysis. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001, p. 328. ISBN: 0-7923-6945-9.

Hooper, A. "A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches". In: Geophysical Research Letters 35 (2008). ISSN: 0094-8276. doi: 10.1029/2008GL034654.

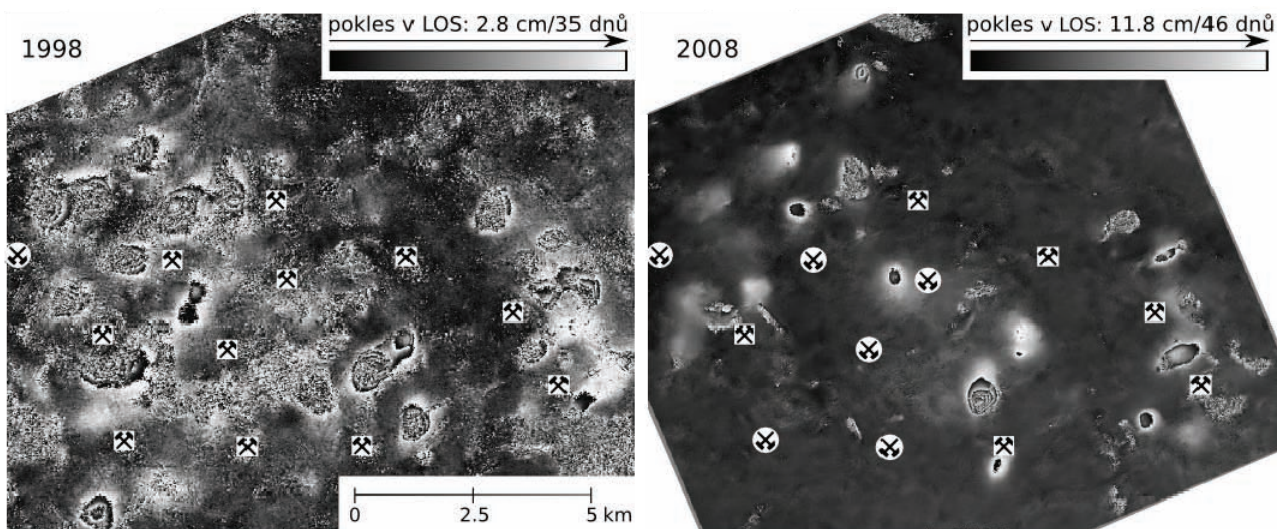
Hooper, A. "Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation". PhD thesis. Stanford University, 2006.

Jiráňková, E. "Časoprostorové vytváření poklesové kotliny v závislosti na charakteru horského masivu". PhD teze. Ostrava: VŠB-TUO, 2006. Dostupné na WWW: <<http://hdl.handle.net/10084/76752>>

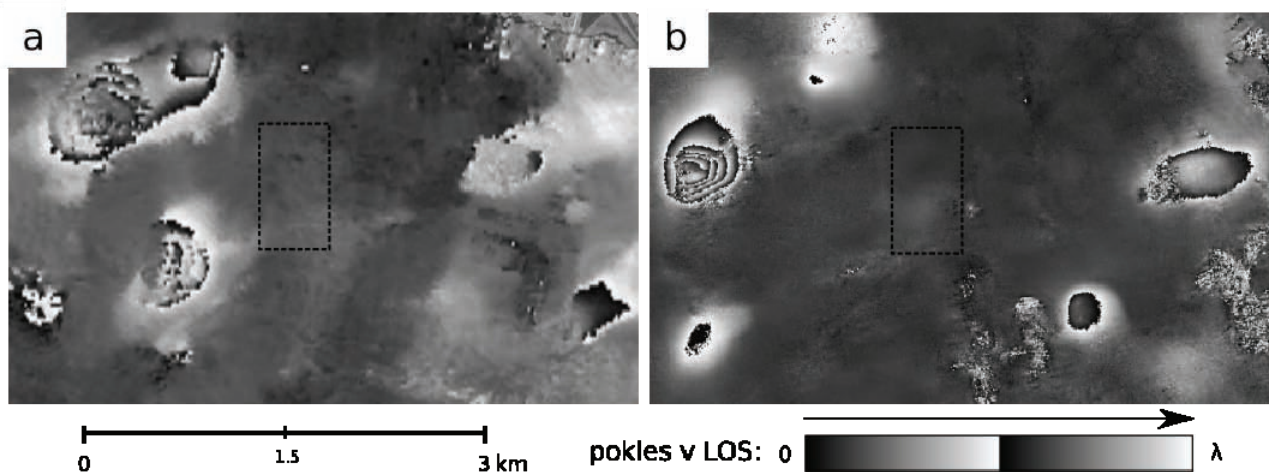
Kampes, B. M., Hanssen, R. F., Perski, Z. "Radar interferometry with public domain tools". In: Fringe Workshop. Frascati: ESA, 2003, s. 6.

Martinec, P., Schejbalová, B. "History and environmental impact of mining in the Ostrava - Karviná coal field (Upper Silesian coal basin, Czech Republic)". In: Geologica Belgica. Proceedings of the 5th European Coal Conference 7.3-4 (2004), pp. 215–224.

Obrázky a přílohy



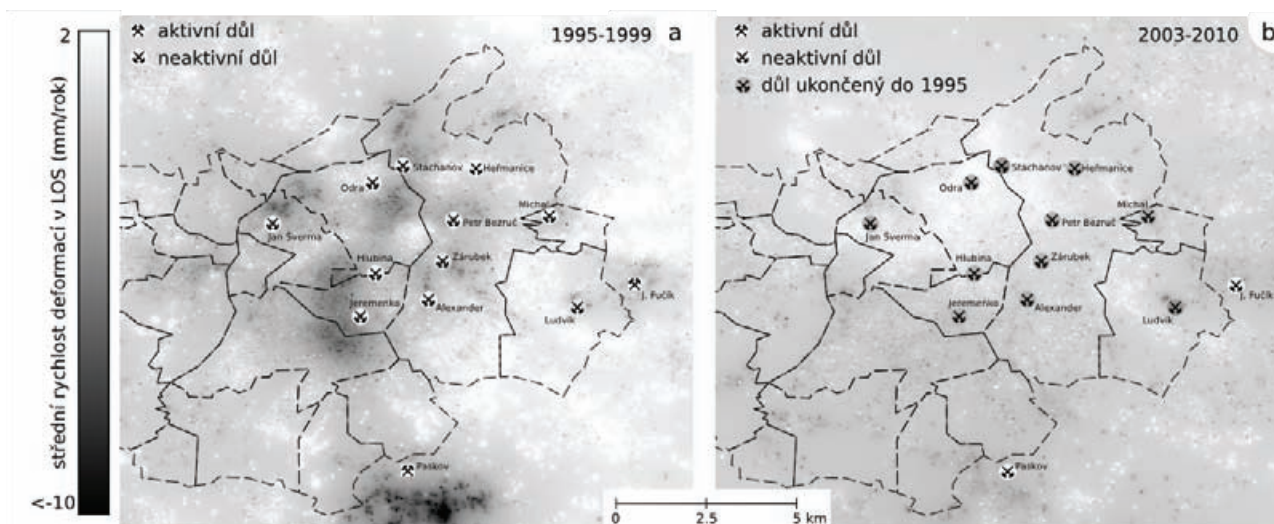
Obr. 1 - Poklesové kotliny dolů karvinské části OKR z interferogramů:
 vlevo: ERS-2 23/02/1998 - 30/03/1998 (35 dnů),
 vpravo: Alos Palsar 27/01/2008 - 13/03/2008 (46 dnů)



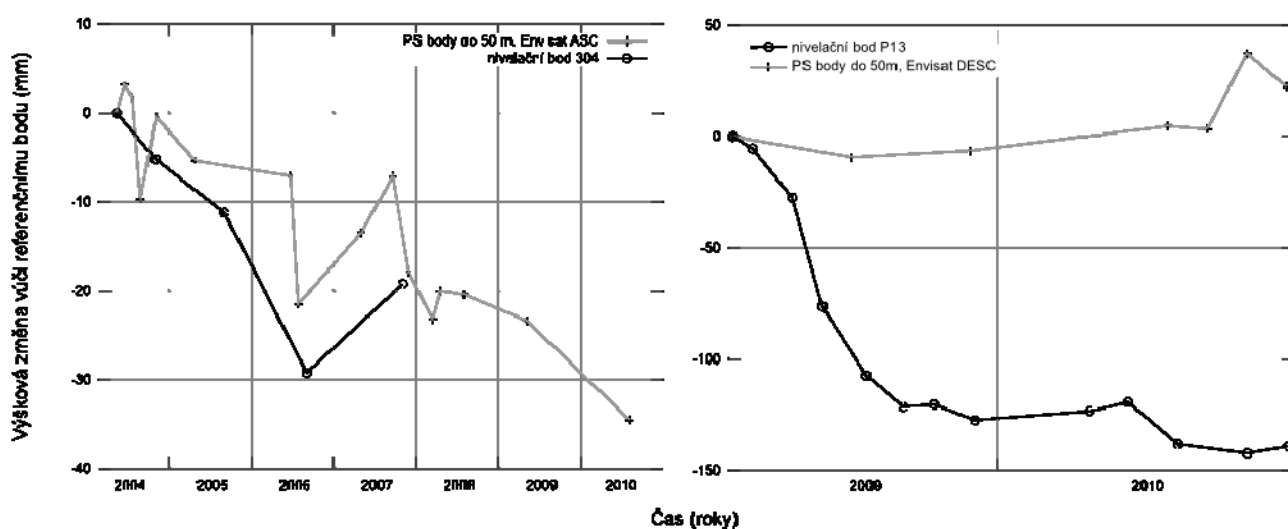
Obr. 2 – Přiblížení interferogramů na oblast u Stonavy – vyznačené je území sledované pravidelnými nivelačními měřeními.

a) ERS-2 23/02/1998 - 30/03/1998 (35 dnů), $\lambda = 5.6$ cm

b) Alos Palsar 27/01/2008 - 13/03/2008 (46 dnů), $\lambda = 23.6$ cm



Obr. 2 – Interpolované zpracování oblasti Ostrava metodou MT-InSAR:
 a) ERS 08/1995-06/1999; b) Envisat 12/2002-09/2010



Obr. 3 – Srovnání výsledků zpracování MT-InSAR a nivelačních dat z oblasti Dětmrovic (vlevo) a okolí Dolu Karviná: závod Lazy (vpravo)