

Załącznik 3  
Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć  
naukowych w języku polskim

## 1. Imię i Nazwisko

Wojciech Milczarek

## 2. Dyplomy i stopnie naukowe

- Stopień doktora w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie górnictwo i geologia inżynierska (specjalność: geodezja inżynierska, ochrona terenów górniczych), Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii Górnictwa i Geologii, 2011.
- Dyplom magistra inżyniera, kierunek geodezja i kartografia, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, 2010.
- Dyplom magistra inżyniera, kierunek górnictwo i geologia inżynierska, Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii Górnictwa i Geologii, 2006.

## 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- październik 2013 - obecnie, Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii Górnictwa i Geologii, Zakład Geodezji i Geoinformatyki, adiunkt,
- czerwiec 2012 - wrzesień 2012, University of New Brunswick, Canadian Centre for Canadian Centre for Geodetic Engineering, Fredericton, Kanada, naukowiec wizytujący (visiting researcher),
- wrzesień 2011 - wrzesień 2013, Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii Górnictwa i Geologii, Zakład Geodezji i Geoinformatyki, asystent.

W dniu 1 października 2011 roku zostałem zatrudniony na stanowisku asystenta w Zakładzie Geodezji i Geoinformatyki, Wydziału Geoinżynierii Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej. Dwa lata później objąłem stanowisko adiunkta naukowo-dydaktycznego w tym samym zakładzie. Nieprzerwanie od 2012 roku jestem kierownikiem studium podyplomowego *Systemy Informacji Geograficznej* organizowanym przez Centrum Kształcenia Ustawicznego oraz Wydział Geoinżynierii Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej. Od 1 października 2016 roku jestem prodziekanem ds. studenckich na swoim macierzystym Wydziale.

Odbyte zagraniczne staże naukowe opisałem w załączniku nr 5 (wykaz dorobku habilitacyjnego), w punkcie III (podpunkt L).

## 4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.)

### A. tytuł osiągnięcia naukowego

Podstawą ubiegania się o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego jest zbiór, powiązanych tematycznie, siedmiu publikacji w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports oraz jednej pozycji z ministerialnej listy B czasopism. Tytuł osiągnięcia naukowego brzmi:

### **Identyfikacja przemieszczeń powierzchni na terenach górniczych i pogórnich z wykorzystaniem satelitarnej interferometrii radarowej**

Przedstawiony poniżej cykl publikacji dotyczy szczegółowych zagadnień w zakresie wykorzystania satelitarnej interferometrii radarowej w detekcji przemieszczeń na powierzchni wywołanych wpływami eksploatacji górniczej.

**B. Prace stanowiące osiągnięcie naukowe**

**O1 Milczarek W.**, Application of Small Baseline Subset Time Series Method with Atmospheric Correction in Monitoring Results of Mining Activity on Ground Surface and in Detecting Induced Seismic Events. Remote Sensing. 2019, (*artykuł przyjęty do publikacji*).  
**IF = 3.406, pkt MNiSzW 35**

**O2 Milczarek W.**, Investigation of post induced seismic deformation of the 2016 MW 4.2 Tarnovek Poland mining tremor based on DInSAR and SBAS method Acta Geodynamica et Geomaterialia. 2019, vol. 15, No. 2(194).  
**IF = 0.886, pkt MNiSzW 20**

**O3 Milczarek W.**, Kopec, A., Głębicki D., Estimation of Tropospheric and Ionospheric Delay in DInSAR Calculations: Case Study of Areas Showing (Natural and Induced) Seismic Activity. Remote Sensing. 2019, 11, 621.  
**IF = 3.406, pkt MNiSzW 35**

*Mój udział procentowy w powstanie pracy wynosi 80%\*.*

**O4 Blachowski, J., Kopec, A., Milczarek W., Owczarz, K.** Evolution of Secondary Deformations Captured by Satellite Radar Interferometry: Case Study of an Abandoned Coal Basin in SW Poland. Sustainability 2019, 11, 884.  
**IF = 2.075, pkt MNiSzW 20**

*Mój udział procentowy w powstanie pracy wynosi 70%\*.*

**O5 Blachowski J., Jiráňková E., Lazecký M., Kadlečík P., Milczarek W.**, Application of satellite radar interferometry (PSInSAR) in analysis of secondary surface deformations in mining areas. Case studies from Czech Republic and Poland. Acta Geodynamica et Geomaterialia. 2018, vol. 15, nr 2, s. 173-185.  
**IF = 0.886, pkt MNiSzW 20**

*Mój udział procentowy w powstanie pracy wynosi 30%\*.*

**O6 Milczarek W., Blachowski J., Grzempowski P.**, Application of PSInSAR for assessment of surface deformations in post-mining area - case study of the former Walbrzych hard coal basin (SW Poland). Acta Geodynamica et Geomaterialia. 2017, vol. 14, nr 1, s. 41-52.  
**IF = 0.886, pkt MNiSzW 20**

*Mój udział procentowy w powstanie pracy wynosi 75%\*.*

**O7 Milczarek W., Blachowski J., Grzempowski P.**, Wykorzystanie satelitarnej interferometrii radarowej w badaniach deformacji powierzchni w górnictwie odkrywkowym węgla brunatnego. Górnictwo Odkrywkowe. 2017, nr 1, s. 22-27.  
**IF = -, lista B, pkt MNiSzW 7**

*Mój udział procentowy w powstanie pracy wynosi 75%\*.*

**O8 Blachowski J., Milczarek W., Grzempowski P.**, Historical and present-day vertical movements on old mining terrains - case study of the Walbrzych coal basin (SW Poland). Acta Geodynamica et Geomaterialia. 2015, vol. 12, nr 3, s. 227-236.

**IF = 0.561, pkt MNiSzW 20**

*Mój udział procentowy w powstanie pracy wynosi 25%\*.*

\* - Oświadczenia autorów publikacji wieloautorskich zamieściłem w załączniku nr 7.

**C. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania**

**Geneza prowadzonych badań**

Od początku aktywności naukowej w sferze moich zainteresowań znajdowało się określanie wpływu eksploatacji górniczej na powierzchnie terenu. W pierwszych latach związanych z realizacją pracy doktorskiej skupiłem się na wyznaczeniu wielkości deformacji pogórnich, charakterystycznych dla terenów na których zakończono eksploatację. Pierwszym obszarem badawczym był rejon byłych Wałbrzyskich Kopalń Węgla Kamiennego (WKWK). Celem przeprowadzonych przeze mnie prac było dostarczenie danych ilościowych i jakościowych do wiarygodnej oceny zjawiska deformacji powierzchni górotworu po zakończeniu eksploatacji górniczej. Zakres zrealizowanych prac badawczych obejmował m.in.:

- + opracowanie przestrzennego modelu geologicznego niecki wałbrzyskiej. Model zintegrowałem z bazą danych GIS-WKWK, w której zgromadziłem przestrzenną informację obejmującą m.in. zasięg prowadzonej eksploatacji górniczej sięgającej początku XIX w.
- + obliczenia numeryczne (metoda elementów skończonych), które bazowały na autorskiej metodyce obliczeń numerycznych przeprowadzonych na modelach teoretycznych i rzeczywistych uwzględniając eksploatację pokładów oraz odbudowę poziomów wodonośnych w górotworze. W obliczeniach uwzględniłem wpływ lokalnych uskoków tektonicznych na wielkość przemieszczeń powierzchni.
- + opracowanie, a następnie założenie sieci kontrolno-pomiarowej na fragmencie obszaru WKWK. Sieć składała się z punktów GPS, zdestabilizowanych na obszarze Wałbrzycha oraz linii niwelacyjnych. W latach 2009-2010 na ww. sieci przeprowadziłem dwie kampanie pomiarowe.

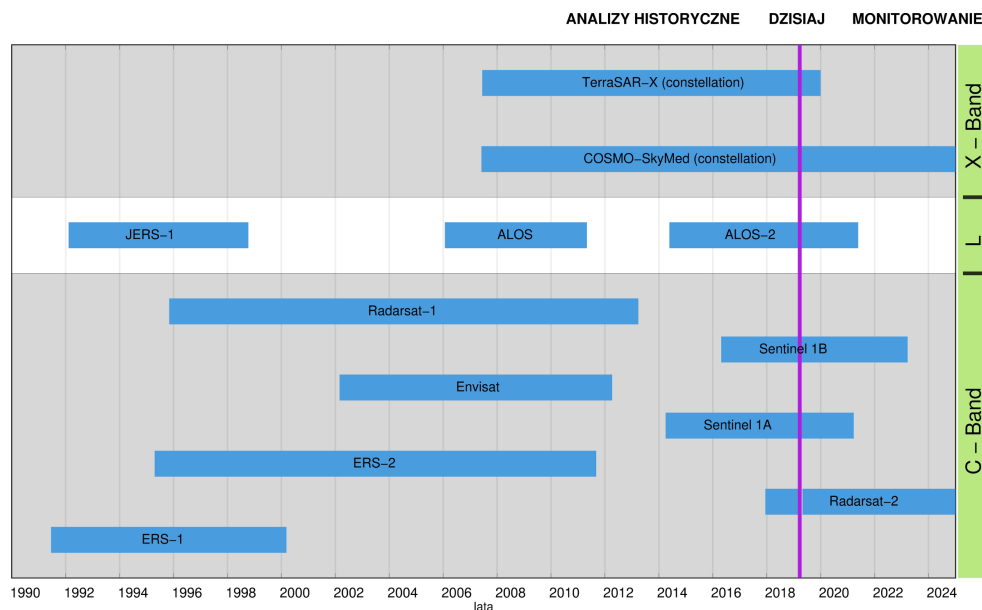
W wyniku przeprowadzonych obliczeń numerycznych wykazałem, że odbudowa karbońskiego poziomu wodonośnego w okresie poeksploatacyjnym miała istotny wpływ na wypiętrzenie powierzchni wałbrzyskiego terenu. W wybranych podobszarach byłego zagłębia powierzchnia terenu podnosiła się w zakresie od 5 do 8% wartości pionowych przemieszczeń zarejestrowanych w okresie funkcjonowania zagłębia. Przeprowadzone przeze mnie pomiary niwelacyjne w sieci badawczej na fragmencie dawnego zagłębia w okresie 2009-2010, wykazały istotne pionowe przemieszczenia powierzchni górotworu w granicach od -14.1 mm do +3.5 mm. Wyniki pomiarów satelitarnych GPS, które wykonałem w tym samym okresie, wykazały istotne przemieszczenia poziome powierzchni górotworu w granicach 5-8 mm. Zarówno przemieszczenia pionowe jak również poziome wskazały na ciągłą aktywność powierzchni górotworu tego obszaru.

Przedstawiony powyższej szczegółowy zakres badań zrealizowanych w okresie studium doktorskiego miał na celu wyraźne zaznaczenie granicy pomiędzy badaniami prowadzonymi przed i po uzyskaniu stopnia doktora.

Stopniowo swoje zainteresowania badawcze w pierwszych latach po uzyskaniu stopnia doktora zacząłem skupiać na szeroko rozumianej satelitarnej interferometrii radarowej (*Interferometric Synthetic Aperture Radar - InSAR*). Doświadczenia jakie zdobyłem w czasie przygotowywania pracy doktorskiej utwierdziły mnie w przekonaniu, że metody InSAR mogą w niedalekiej przyszłości stanowić alternatywę dla klasycznych pomiarów (niwelacja precyzyjna, pomiary GNSS) deformacji powierzchni na terenach górniczych oraz pogórnich.

## Wprowadzenie

Satelitarna interferometria radarowa jest jedną z zdalnych technik obserwacji powierzchni Ziemi. Umożliwia wykrywanie zmian zachodzących na powierzchni wynikających z naturalnych procesów geologicznych, tektonicznych, wulkanicznych jak również procesów antropogenicznych. W sensie przestrzennym InSAR umożliwia detekcję zmian na powierzchni terenu od niewielkich lokalnych zjawisk takich jak np. wstrząsy górnicze do trzęsień ziemi, o regionalnym zasięgu. Początki InSAR datowane są na rok 1978, kiedy to na orbicie okołoziemskiej umieszczono pierwszego satelitę z wyposażonego w aparaturę SAR - SEASAT-1 (NASA). Właściwy rozwój metod InSAR przypada na lata 90-te ubiegłego wieku. W tym okresie krajowe oraz międzynarodowe agencje kosmiczne umieściły na orbitach satelity: ERS-1 (1991), JERS-1 (1992), ERS-2 (1995), RADARSAT-1 (1995). Sukcesywnie w kolejnych latach umieszczano kolejne satelity (rys. 1).



Rys. 1: Wybrane satelity wyposażone w aparaturę SAR wykorzystywane w monitorowaniu powierzchni.

Dane SAR gromadzone od ponad 25 lat pozwalają na analizę zdarzeń, które miały miejsce w przeszłości. Obecnie aktywne satelity (m.in: Sentinel 1A, Sentinel 1B, TerraSAR-X (konstelacja satelitów), Cosmo-SkyMed (konstelacja satelitów), ALOS-2) umożliwiają prowadzenie ciągłego monitoringu powierzchni niemal dowolnego obszaru na ziemi.

Podstawowym wynikiem przetworzenia dwóch zobrazowań radarowych jest interferogram, który oprócz informacji o deformacji powierzchni terenu zawiera również szereg innych składowych. Równanie fazy interferometrycznej dla dowolnej pary SAR można przedstawić za pomocą równania postaci:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} (\Delta r_{disp}^{ij} + \Delta r_{geom}^{ij} + \Delta r_{trop}^{ij} + \Delta r_{iono}^{ij} + \Delta r_n^{ij}) \quad (1)$$

gdzie:

$\lambda$  - reprezentuje długość fali,  $\Delta r_{disp}^{ij}$  - to przemieszczenia powierzchni,  $\Delta r_{geom}^{ij}$  - reprezentuje geometryczną różnicę zakresu od radaru do celu spowodowaną niezerową przestrzenną linią bazową między dwiema orbitami,  $\Delta r_{trop}^{ij}$  - opóźnienie troposferyczne,  $\Delta r_{iono}^{ij}$  - opóźnienie jonosferyczne oraz  $\Delta r_n^{ij}$  - szum termiczny i zmienności rozpraszania. Składowa deformacyjna zwiiera informacje o ewentualnych przemieszczeniach pomiędzy kolejnymi akwizycjami  $ij$  danych radarowych.

Wyznaczenie  $\Delta r_{disp}^{ij}$  jest kluczowe w obliczeniach metodami InSAR. Niemniej jednak często suma pozostałych składowych jest na tyle istotna, że utrudnia lub wręcz uniemożliwia wyznaczenia szukanego przemieszczenia. Przy obecnym stanie wiedzy składowe topograficzna oraz błędy orbit można w relatywnie łatwy sposób wyznaczyć. Natomiast opóźnienie atmosferyczne, na które składają się wpływy jonosfery oraz troposfery w odniesieniu do metod InSAR jest obecnie przedmiotem intensywnych badań (Li i in., 2009; Doin i in., 2009; Brcic i in., 2010; Rosen i in., 2010; Bekaert i in., 2015; Gomba i in., 2016; Fattahi i in., 2017; Yu i in., 2018; Zhu i in., 2018).

Deformacje powierzchni terenu wywołane podziemną aktywnością górniczą bez wątpienia stanowią jeden z głównych negatywnych wpływów ingerencji człowieka na górotwór. W zależności od warunków geologicznych deformacje powierzchni mogą mieć ciągły lub nieciągły charakter. Do najczęściej stosowanych metod pomiaru deformacji powierzchni terenu na obszarach górniczych zaliczamy: (I) niwelację precyzyjną oraz pomiary GNSS. W mojej ocenie do obok wymienionych metod należy również zaliczyć metody bazujące na satelitarnej interferometrii radarowej oraz ground-based InSAR (Antonello i in., 2004; Carlà i in., 2018).

W przypadku metod InSAR stosowane są metody: różnicowa DInSAR (*Differential SAR Interferometry*) (Duque i in., 2007; Paradella i in., 2015; Peduto i in., 2017) oraz metody z grupy metod *time series*: PSInSAR (*Persistent Scatterer Interferometry*) wraz z jej odmianami (Jung i in., 2007; Liu i in., 2014) oraz SBAS (*Small BAseline Subset*) (Ma i in., 2016; Zhao i in., 2013). Ponadto metody InSAR są wykorzystywane w detekcji deformacji powierzchni na terenach pogórnich – deformacji pogórnich (Samsonov i in., 2013; Cuenca i in., 2013; Blachowski i in., 2019).

W niektórych przypadkach podziemna eksploatacja górnicza może powodować powstawanie indukowanych zjawisk sejsmicznych - wstrząsów górniczych. Wpływ sejsmiki indukowanej, podobnie jak wpływ podziemnej i odkrywkowej eksploatacji górniczej na powierzchnie, może być obserwowany za pomocą satelitarnych danych radarowych (Malinowska i in., 2018; Milczarek, 2019).

### Cel naukowy

Celem jednotematycznego cyklu publikacji pt. *Identyfikacja przemieszczeń powierzchni na terenach górniczych i pogórnich z wykorzystaniem satelitarnej interferometrii radarowej* było zbadanie możliwości wykorzystania satelitarnej interferometrii radarowej na terenach górniczych oraz pogórnich. Dla tak postawionego głównego celu naukowego sformułowałem następujące cele szczegółowe:

- I wykazanie możliwości zastosowania metod typu *time series* InSAR (PSInSAR oraz SBAS) w celu badania długookresowych przemieszczeń powierzchni na terenach pogórnich oraz górniczych,
- II opracowanie sposobu jednoczesnej estymacji wpływu opóźnień: troposferycznego i jonosferycznego w obliczeniach danych SAR,
- III wykazania możliwości zastosowania metod InSAR w detekcji indukowanych zdarzeń sejsmicznych na terenach górniczych.

Przedstawione powyżej cele szczegółowe są ze sobą ściśle powiązane, a ich kolejność ma istotne znaczenie. Pierwsze próby wykorzystania przeze mnie danych SAR dotyczyły rejonu byłych kopalń wałbrzyskich. Najstarsza publikacja w przedstawionym cyklu (O8) prezentuje wyniki dotyczące analizy przemieszczeń powierzchni terenu pogórnich w Wałbrzychu. Przedstawione analizy oparłem na danych geodezyjnych pochodzących z pomiarów państwowej osnowy wysokościowej II klasy z 1973, 1993 roku. Ponadto wykorzystałem wyniki pomiarów geodezyjnych wykonanych w 2014 roku na opracowanej przeze mnie sieci niwelacyjnej zrealizowanej w ramach projektu badawczego pt: *Określenie stanu aktywności powierzchni terenu na obszarze poeksploatacyjnym byłych wałbrzyskich kopalń węgla kamiennego*, którego byłem kierownikiem. Przeprowadzona analiza z wykorzystaniem różnych funkcji interpolacyjnych i obliczeń opartych na algebrze mapy pozwoliła m.in. na określenie przemieszczeń powierzchni terenu w szybkim okresie eksploatacji (lata 90 ubiegłego wieku) oraz po jej zakończeniu. Nie mniej jednak publikacja ta stanowiła początek moich badawczych zmagani na polu wykorzystania metod InSAR jako sposobu monitorowania aktywności terenów górniczych i pogórnich. Zasadniczym słabym punktem przedstawionych w pracy (O8) wyników było ich czasowe oraz przestrzenne rozmieszczenie. Trudno bowiem analizować wyniki przemieszczeń o stosunkowo niewielkiej rocznej i co ważniejsze zanikającej dynamice, a takimi cechami charakteryzują się deformacje wtórne. Drugim aspektem była liczność zbioru punktów pomiarowych, na podstawie których obliczono przemieszczenia powierzchni na obszarze Wałbrzyska. Z drugiej jednak strony zaobserwowane na reperach przemieszczenia dla okresu 1993-2014 wskazały na niezakończony proces stabilizacji górotworu w okresie poeksploatacyjnym oraz opóźnioną reakcję górotworu na powrót zwierciadła wód podziemnych do stanu pierwotnego po zakończeniu eksploatacji. Otrzymane wyniki jednoznacznie wskazywały, że na obszarze Wałbrzyska w dalszym ciągu można obserwować i badać

deformacje pogórnice. Nie mniej jednak w tamtym okresie nie było danych na podstawie których można byłoby opisać ten proces.

W tym punkcie mojej aktywności badawczej pojawia się satelitarna interferometria radarowa. Studium literatury pokazało mi, że w tym okresie istniały już pozycje, które dotyczyły wyznaczania przemieszczeń na terenach pogórnich w Europie (Samsonov i in., 2013; Cuenca i in., 2013). Zasadniczą różnicą pomiędzy tymi obszarami, a Wałbrzychem była dostępność innych danych pomiarowych (niwelacja precyzyjna i/lub pomiary GNSS). Rejon wałbrzyski z tego powodu był i po części w dalszym ciągu jest unikatowy. Trudno bowiem jest znaleźć drugi tak charakterystyczny obszar badawczy. Jest tak ponieważ Wałbrzyskie Kopalnie Węgla Kamiennego postawiono niemal równocześnie w stan likwidacji. W procesie likwidacji kolejnych zakładów górniczych stopniowo zakańczano odwadniania górotworu poprzez samoczynne zatapianie wyrobisk, po zaprzestaniu pompowania wód dołowych. Wykorzystując naturalne uwarunkowania hydrogeologiczne podzielono górotwór na odrębne zbiorniki wodne, które podlegały niezależnemu zatapianiu. Jednocześnie na powierzchni nie prowadzono cyklicznych pomiarów geodezyjnych, które dostarczyłyby danych o aktywności powierzchni.

W tamtym okresie w mojej ocenie wykorzystanie satelitarnej interferometrii radarowej wydawało się naturalnym kierunkiem dalszych badań. Metody InSAR teoretycznie dają możliwość analizy danych archiwalnych (począwszy od roku 1995, rys. 1) oraz prowadzenia ciągłego monitorowania obszaru oraz prowadzenie monitoringu w czasie prawie rzeczywistym.

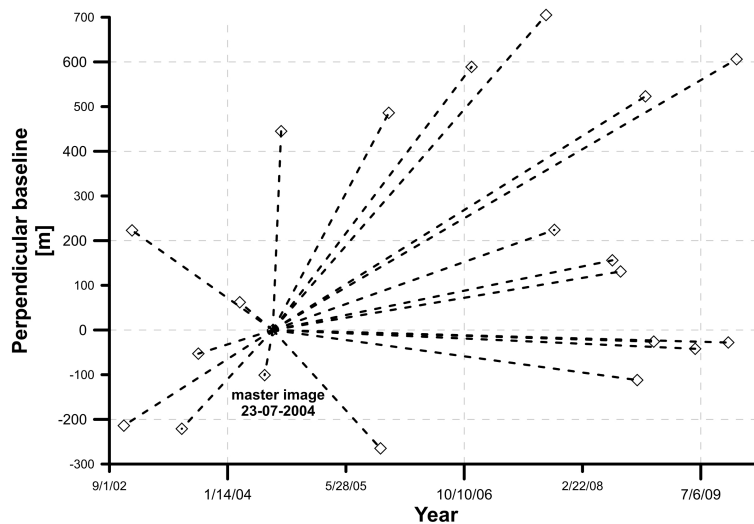
### Wykazanie możliwości zastosowania metod typu *time series* InSAR w celu badania długookresowych przemieszczeń powierzchni na terenach pogórnich i górniczych

Problematyka oceny wpływu eksploatacji podziemnej na powierzchnie górotworu jest przedmiotem licznych badań prowadzonych przez szereg środków naukowo-badawczych zarówno w kraju jak i zagranicą. Duże zainteresowanie wynika z faktu, że przedstawienie procesów zachodzących w górotworze w którym prowadzona jest eksploatacja jest niezwykle skomplikowane i trudne do opisania. Większość obecnie stosowanych metod oceny wpływu eksploatacji na powierzchnię, również tych których celem jest prognozowanie wpływów wymaga dostarczenia informacji o rzeczywistym stanie przemieszczeń na powierzchni. W takim przypadku tego typu dane pozyskują się najczęściej z pomiarów techniką niwelacji precyzyjnej lub z szeroko rozumianych pomiarów GNSS.

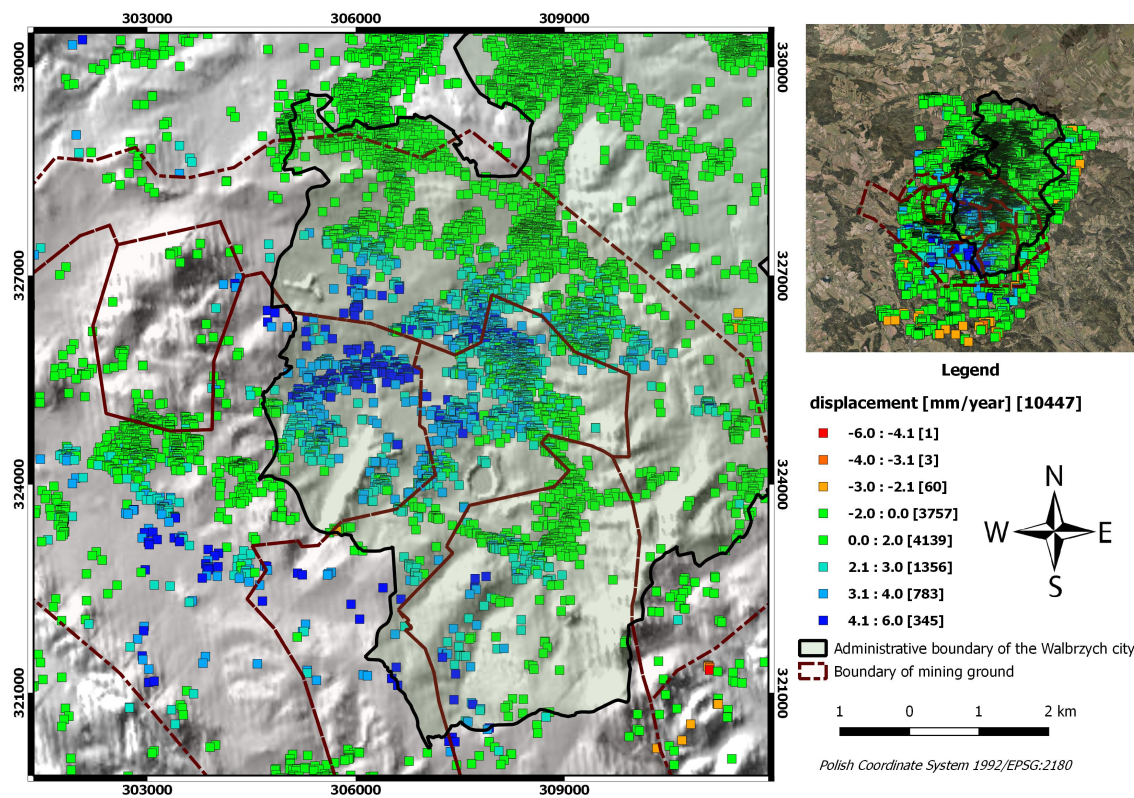
Drugim obszarem zastosowania przez mnie metod *time series* są deformacje wtórne często zamienne określane jako deformacje pogórnice. Są one charakterystyczne dla obszarów gdzie zakończono eksploatację górniczą. Deformacje tego rodzaju są związane z procesami zachodzącymi wewnątrz górotworu, głównie wynikających z odbudowy poziomów wodonośnych. Tym samym obserwowane w tym czasie przemieszczenia powierzchni terenu mogą mieć kierunek odwrotny (wypiętrzenia) w stosunku do przemieszczeń (obniżenia) obserwowanych w okresie eksploatacyjnym.

### Rejon wałbrzyski

W publikacji (O6) przedstawiłem pierwsze wyniki wykorzystania danych SAR na obszarze Wałbrzyska. Obliczenia oparłem na danych z satelity Envisat z okresu 2002-2009. Łączna liczba obrazowań wyniosła 21. Obrazowania radarowe przetworzyłem wykorzystując metodę stabilnych rozpraszaczy (PSInSAR). W tej metodzie kluczowym jest dobór właściwego zdjęcia, tzw. *master* (rys. 2). Względem obrazu *master* wyznaczane są pary obrazowań SAR, a dalej interferogramy. Rezultatem moich obliczeń był zbiór punktów (około 10 000) dla których wyznaczyłem przemieszczenia LOS (*Line of Sight*), przemieszczenia wzdłuż linii obserwacji satelity). Największa liczba punktów zlokalizowana była w obszarze miasta co wynika faktu, że najwięcej stabilnych rozpraszaczy tj. dachy budynków, powierzchnie innych konstrukcji budowlanych znajduje się na terenach zurbanizowanych. Średnie zagęszczenie punktów wyniosło około 30 km<sup>2</sup>. Analiza rozkładu punktów PS z zarejestrowanymi znaczącymi dodatnimi ruchami (większą niż 1 mm/rok) pokazała, że większość z nich była zlokalizowana w granicach dawnych terenów górniczych. Istotne ruchy w górę (tj. wypiętrzenia) zaobserwowałem w centralnej i południowych części dawnych terenów górniczych (rys. 4). Największą grupę stanowią punkty PS z średnimi rocznymi ruchami w zakresie od -1,0 mm do +1,0 mm (zaznaczone na szaro) (rys. 4). Publikacja (O6) jest pierwszą pozycją w kraju, która dotyczy



Rys. 2: Czasowo-przestrzenne rozmieszczenie danych SAR z satelity Envisat wykorzystywanych w obliczeniach metodą PSInSAR. Obraz 23-07-2004 został wybrany jako obraz główny (*master image*) (O6).

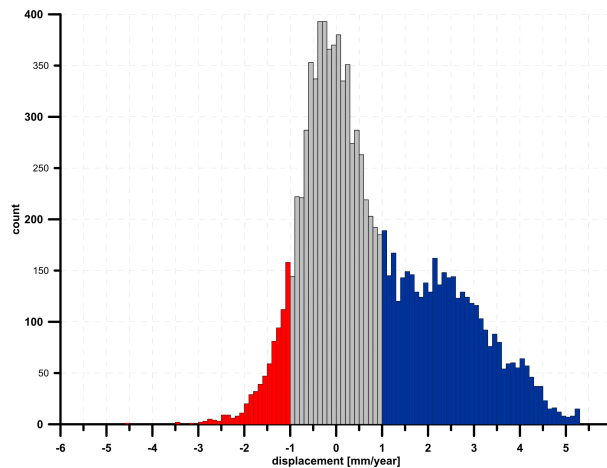


Rys. 3: Przestrzenny rozkład punktów PS i granic dawnych obszarów górniczych w Wałbrzychu (O6).

analizy przemieszczeń w okresie poeksploatacyjnym bazując na metodach InSAR w odniesieniu do całego nieczynnego zagłębia.

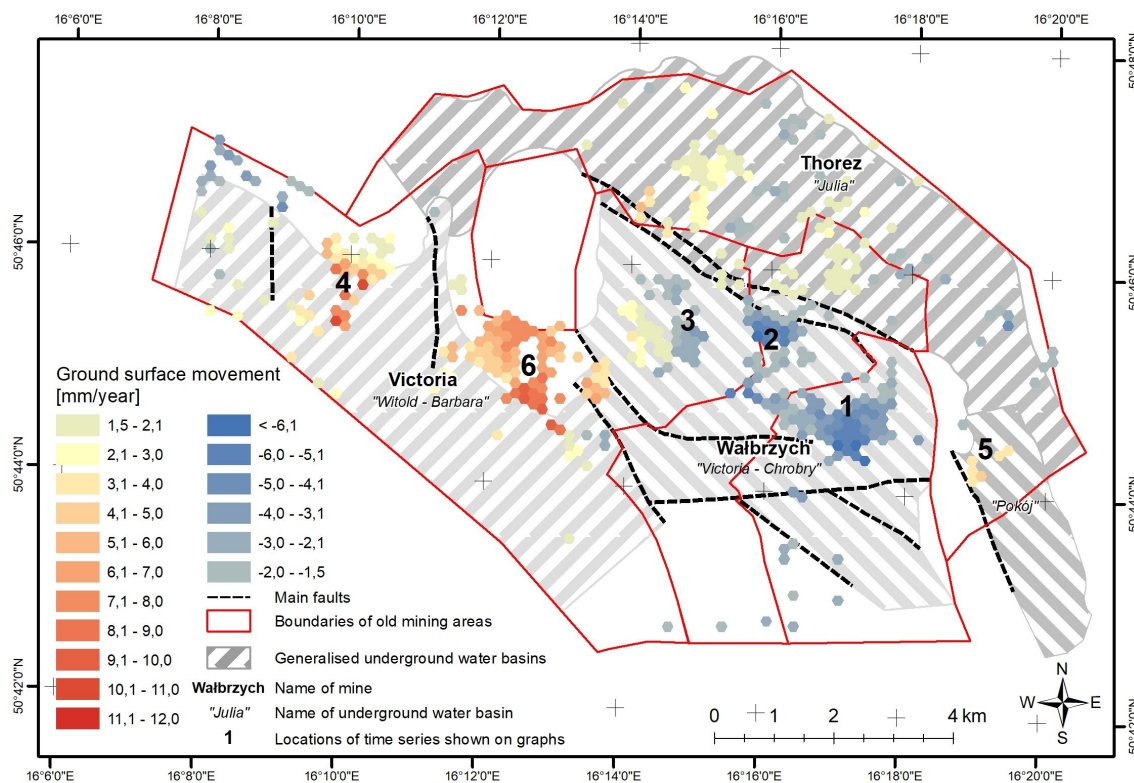
Efektom kontynuacji badań na terenie Wałbrzycha były kolejnie dwie publikacje (O5) oraz (O4). Artykuł (O5) powstał przy współpracy z naukowcami z Faculty of Mining and Geology, VSB-TU Ostrava. Wspólnie przeprowadziliśmy obliczenia wykorzystując metodę PSInSAR oraz przeanalizowaliśmy wyniki w odniesieniu do dwóch obszarów: rejonu wałbrzyskiego oraz rejonu Ostrava-Karviná w Czechach. W odróżnieniu do pozycji (O6) w tym przypadku (dla Wałbrzycha) przeprowadziłem obliczenia na danych SAR pochodzących z satelitów ERS-1 oraz ERS-2 dla okresu 1995 - 2000. Dodatkowo, obliczenia wykonałem dla dwóch niezależnych ścieżek (79 i 308).





Rys. 4: Empiryczny rozkład średnich rocznych ruchów punktów PS (LOS). Niebieski reprezentuje ruch w górę, czerwony reprezentuje osiadanie, a szary oznacza punkty z wartościami w granicach błędu (O6).

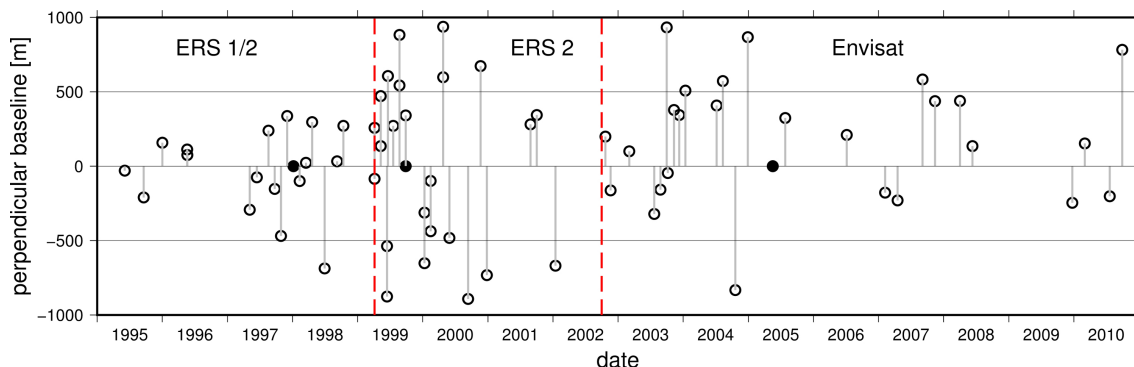
Uzyskane wyniki są szczególnie interesujące ze względu na fakt, że zaobserwowałem w analizowanym okresie obszary w których lokalnie przemieszczenia miały zupełnie odmienny charakter (rys. 5). Przeprowadzona przeze mnie wstępna analiza wyników z lokalizacją zbiorników wód podziemnych dała podstawy do stwierdzenia, że lokalne przemieszczenia mogą być powiązane z procesem odbudowy stosunków wodnych w okresie po zakończonej eksploatacji. Z tego względu postanowiłem kontynuować w tym zakresie badania, których wyniki przedstawiłem w artykule (O4).



Rys. 5: Średnie roczne prędkości przemieszczeń (LOS) powierzchni w latach 1995-2000 wyznaczone dla WKWK w oparciu o metodę PSInSAR (O5).

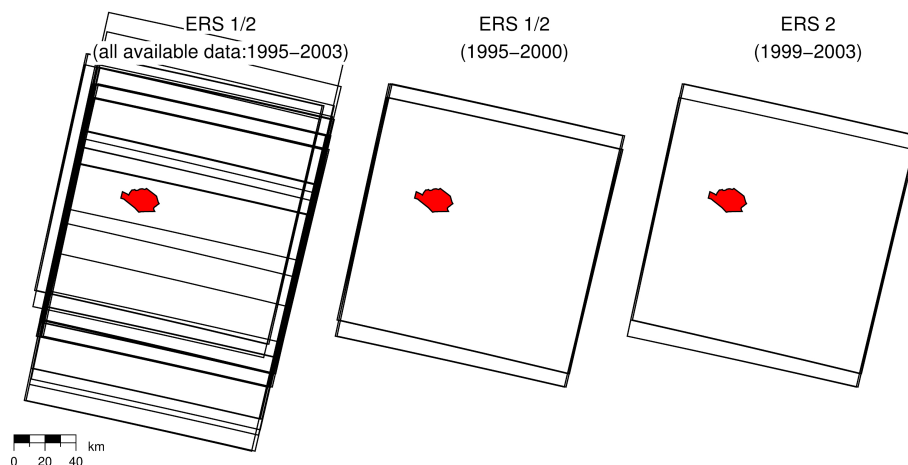
Trzeci artykuł (O4) dotyczący przemieszczeń powierzchni terenu na obszarze Wałbrzycha jest ostatnią pozycją, która w pewnym sensie jest podsumowaniem mojej kilkuletniej pracy badawczej na tym obszarze. Publikacja ta z badawczego punktu widzenia wyróżnia się z kilku istotnych powodów.

Po pierwsze zaprezentowałem w niej obliczenia dla całego możliwego do przeanalizowania okresu - od 1995 do 2010 roku. Po drugie otrzymane wyniki skorelowałem z wysokościami poziomów wodonośnych z dostępnych na obszarze Wałbrzycha piezometrów. Po trzecie, na etapie selekcji *master image* z zbioru danych ERS musiałem rozwiązać problem dużej rozbieżności bazy przestrzennej (rys. 6) oraz wysokimi wartościami różnicy centroid Dopplera (fDC) (niejednokrotnie przekraczającymi wartość 2000 Hz). Nie analizowałem danych od roku 1992 ponieważ od początku 1993 do końca 1994 dane SAR dla obszaru Wałbrzycha były rejestrowane w ekstremalnie różnych położeniach (rys. 7). Nie mniej jednak pomimo wielu prób wyboru właściwego zdjęcia *master* nie udało mi się uzyskać wiarygodnych wyników dla okresu 2002 - 2010. Z tego powodu do analizy po 2002 roku wykorzystałem zobrazenia Envisat, które charakteryzują się znacznie lepszymi wartościami parametrów: baz przestrzennych oraz fDC potencjalnych par. Po czwarte przeprowadziłem trans-



Rys. 6: Zbiorcze zestawienie wykorzystanych danych SAR: ERS od 1995 do 2000, ERS od 1999 do 2003 oraz Envisat od 2002 do 2010. Czarne punkty reprezentują zdjęcia *master* dla każdego obliczeniowego zbioru obliczeniowego. Pionowe przerywane czerwone linie reprezentują granicę pomiędzy zbiorami (O4).

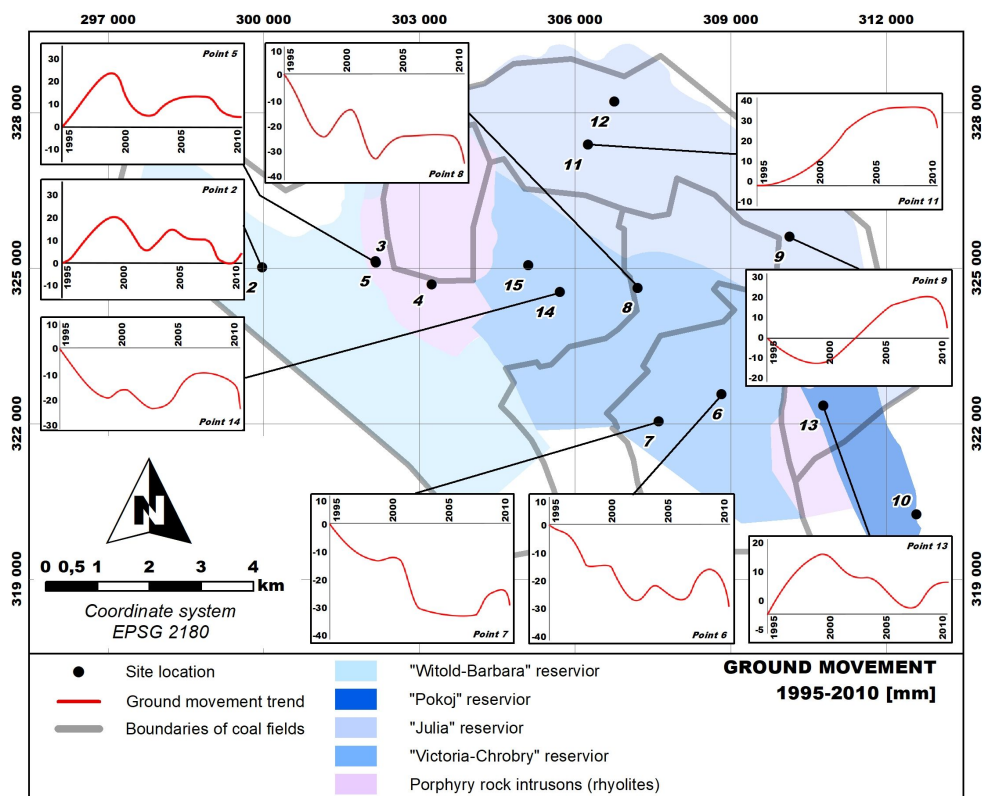
formacje wyników LOS pochodzących z satelitów ERS-1/2 oraz Envisat do jednego układu. Takie podejście umożliwiło mi przeanalizowanie aktywności powierzchni od 1995 do 2010 roku. Dokładną analizę przeprowadziłem z podziałem na wyodrębnione w procesie likwidacji zbiorniki wód podziemnych (rys. 8).



Rys. 7: Selekcja danych SAR z ERS1/2. Czerwonym poligonem zaznaczono lokalizację terenów górniczych WKWK. Po lewej stronie przedstawiono przestrzenne rozmieszczenie danych SAR z analizowanej ścieżki nr 308, okres 1995 - 2010, łącznie 147 zobrażeń. Należy zwrócić uwagę na skalę przesunięcia zobrażeń w kierunku E-W, która maksymalnie wynosiła 11 km. Środkowa część przedstawia wyselekcjonowane zobrażenia dla okresu 1995-2000, a prawa część - dla okresu 1999-2002 (O4).

### Podsumowanie

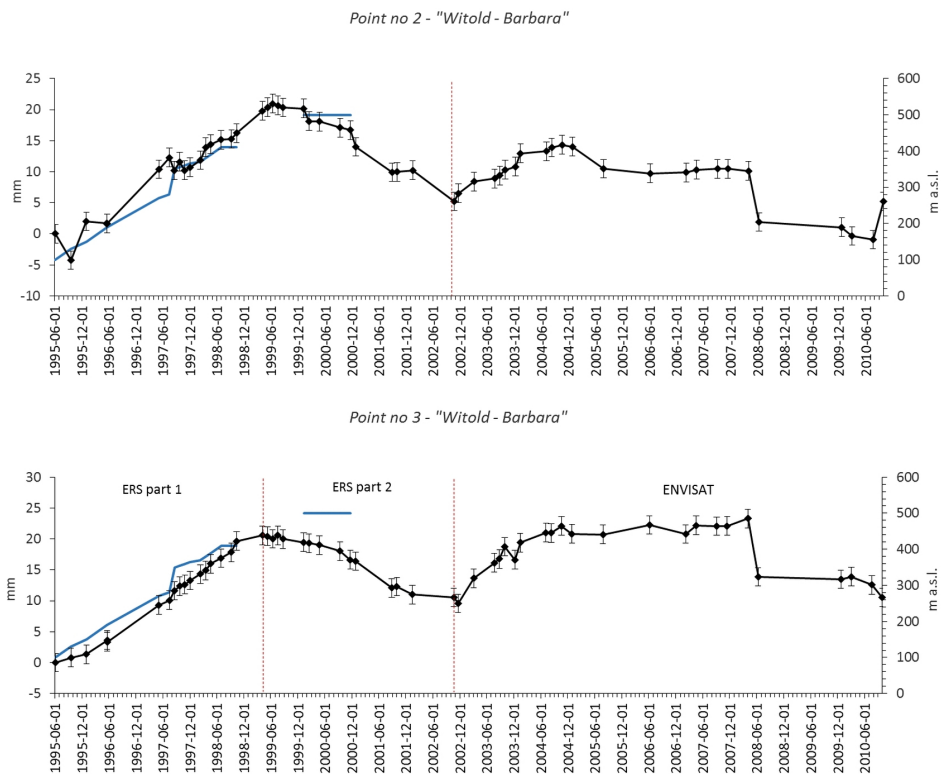
W pierwszym okresie, obejmującym lata 1995 - 2000 wyraźnie zaznaczały się dwa aktywne obszary na powierzchni terenu. Pierwszy zlokalizowany w obrębie zbiornika „Witold-Barbara” wypiętrzał się z maksymalną prędkością na poziomie +6 mm/rok. W tym okresie (1995 - 1999) zbiornik był



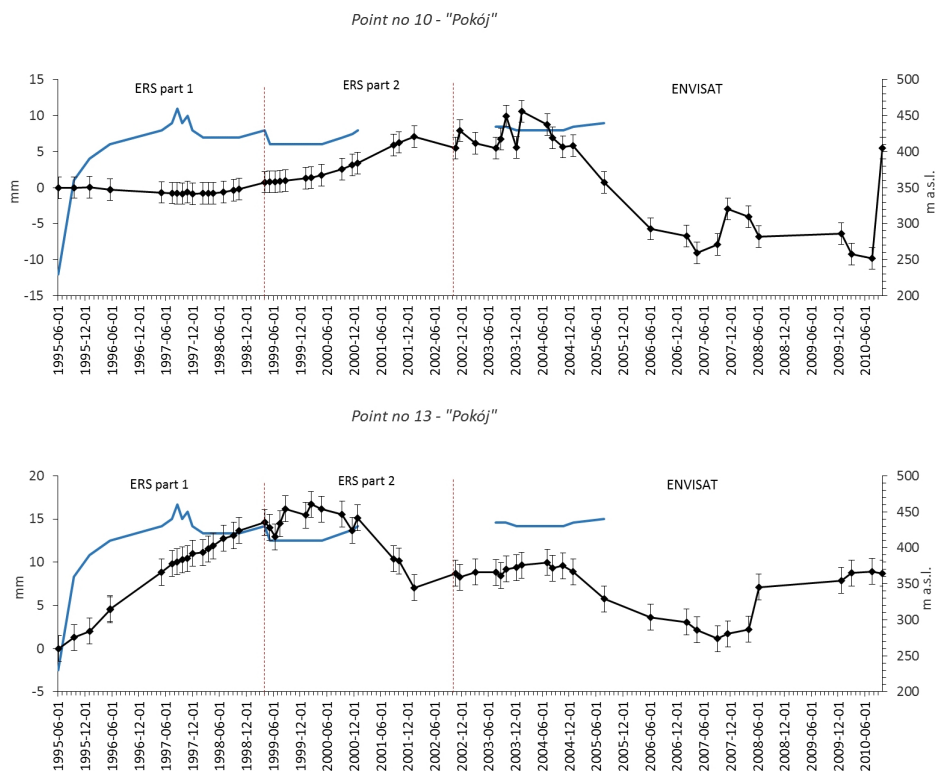
Rys. 8: Lokalizacja reprezentatywnych punktów dla których sporządzono wykresy przemieszczeń LOS od 1995 do 2010 roku (O4).

zatapiany. Powierzchnia terenu nad południową częścią zbiornika „Victoria-Chrobry” obniżała się z maksymalną prędkością na poziomie -6 mm/rok. Na tym obszarze w analizowanym okresie była prowadzona eksploatacja górnicza. W drugim okresie (1999 - 2002) wyraźnie zaznaczony był proces odbudowy poziomu wodonośnego w zbiorniku „Julia”. W konsekwencji na powierzchni obserwowane były wypiętrzenia dochodzące do +8 mm/rok. Okres 2002 - 2010 charakteryzował się wypiętrzeniem w centralnej części zagłębia. Prawdopodobną przyczyną takiego stanu rzeczy był łączny wpływ odbudowy poziomów w zbiornikach „Victoria-Chrobry” oraz „Julia”. Uzyskane wyniki dla obszaru WKWK są zbliżone do tych z rejonu Limburgii (Niemcy) (Cuenca i in., 2013). Podobieństwo dotyczy zarówno wielkości zaobserwowanych tam wypiętrzeń (ponad 20 cm w przeciągu 18 lat) oraz samej dynamiki zjawiska. Zaprezentowane wyniki, podobnie jak w przypadku WKWK jednoznacznie wskazują na bezpośrednią korelację pomiędzy wzrostem podnoszeniem się poziomów wodonośnych, a wypiętrzeniem powierzchni terenu pogórniczego. Zbliżone zachowanie powierzchni zaobserwowano w rejonie Northumberland (Gee i in., 2017). W niektórych przypadkach wyniki przemieszczeń obliczonych bazując na danych ERS 1/2 nie korelowały z danymi hydrogeologicznymi. Odnosząc to do warunków wałbrzyskich stwierdziłem, że specyficzna budowa geologiczna oraz lokalne uskoki tektoniczne spowodowały, że oddziaływanie zatapiających zbiorników wodnych było zawsze obserwowane bezpośrednio nad danym zbiornikiem.

Zaobserwowana na podstawie obliczeń danych SAR i zaprezentowana w artykułach (O4, O5, O6 oraz O8) aktywność powierzchni terenu jednoznacznie wskazuje na związek pomiędzy zatapianiem zbiorników wód podziemnych, a wypiętrzeniem powierzchni terenu. Poczynione przeze mnie spostrzeżenia są zgodne z przykładami w literaturze. Zauważyłem także, że kontrolowanie zatapianie wyrobisk górniczych prowadzone w relatywnie długim okresie czasu minimalizuje skutki oddziaływania tego procesu na powierzchnie terenu. Wykonane przeze mnie analizy pokazały również, że po okresie wypiętrzenia powierzchni terenu, bezpośrednio związanego z odbudową poziomów wodonośnych następuje krótki okres stagnacji, a następnie pewnego rodzaju korekta przemieszczeń. Korekta przejawia się ponownym obniżaniem powierzchni terenu po którym następuje ostateczne ustabilizowanie powierzchni terenu (rys. 9 - 10).



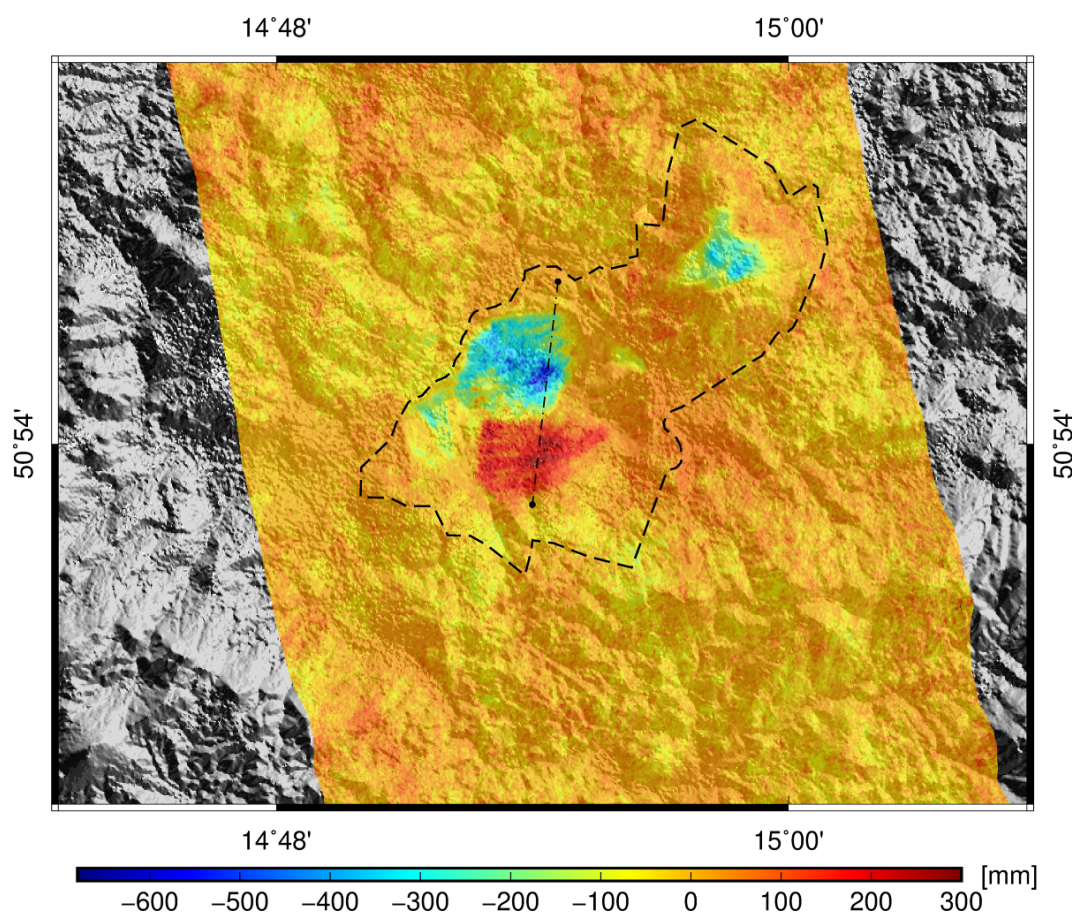
Rys. 9: Wykresy przemieszczeń LOS (czarna linia) oraz zmiany poziomu zwierciadła wód podziemnych (niebieska linia) dla wybranych punktów zlokalizowanych nad zbiornikiem „Witold-Barbara” (O4).



Rys. 10: Wykresy przemieszczeń LOS (czarna linia) oraz zmiany poziomu zwierciadła wód podziemnych (niebieska linia) dla wybranych punktów zlokalizowanych nad zbiornikiem „Pokój” (O4).

### ***Kopalnia węgla brunatnego Turów - KWB Turów***

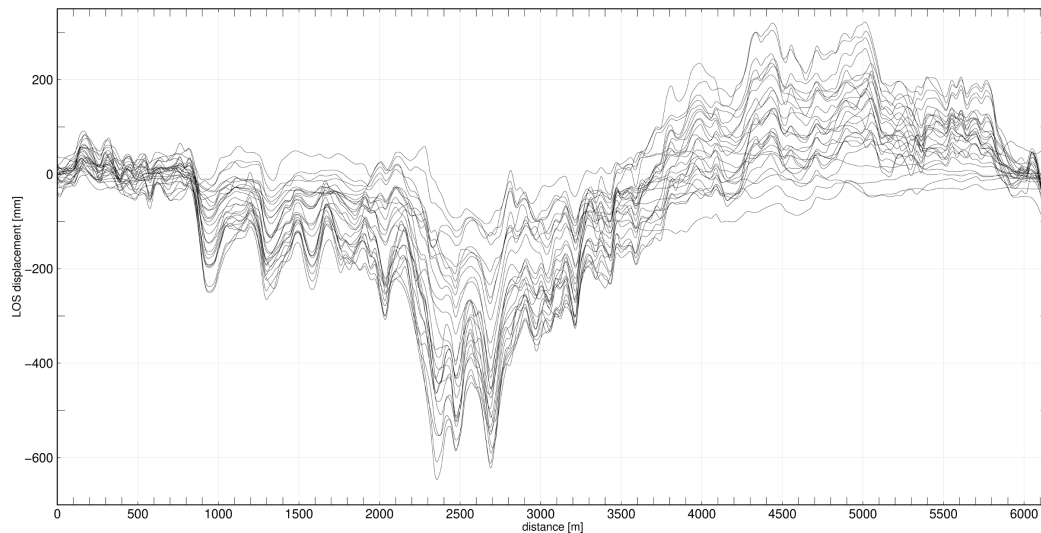
Naturalnym kierunkiem badań, po pracach z rejonu wałbrzyskiego była ocena możliwości wykorzystania danych interferometrycznych dla obszarów górniczo aktywnych. Publikacja (O7) z cyklu publikacji dotyczy wykorzystania danych z satelity Sentinel 1A na obszarze kopalni odkrywkowej. W tym zakresie omawiana praca jest pierwszym tego typu opracowaniem w Polsce. Na podstawie przeprowadzonego przeze mnie studium literatury mogę stwierdzić, że praca ta jest również jedną z pierwszych prac wykorzystujących metodę SBAS oraz dane z satelity Sentinel 1A/B na obszarze kopalni odkrywkowej na świecie.



Rys. 11: Przemieszczenia LOS w okresie 22.11.2015 – 11.04.2016 wyznaczone metodą SBAS, czarną przerywaną linią zaznaczono profil przemieszczeń dla wybranego fragmentu terenu górniczego (O7).

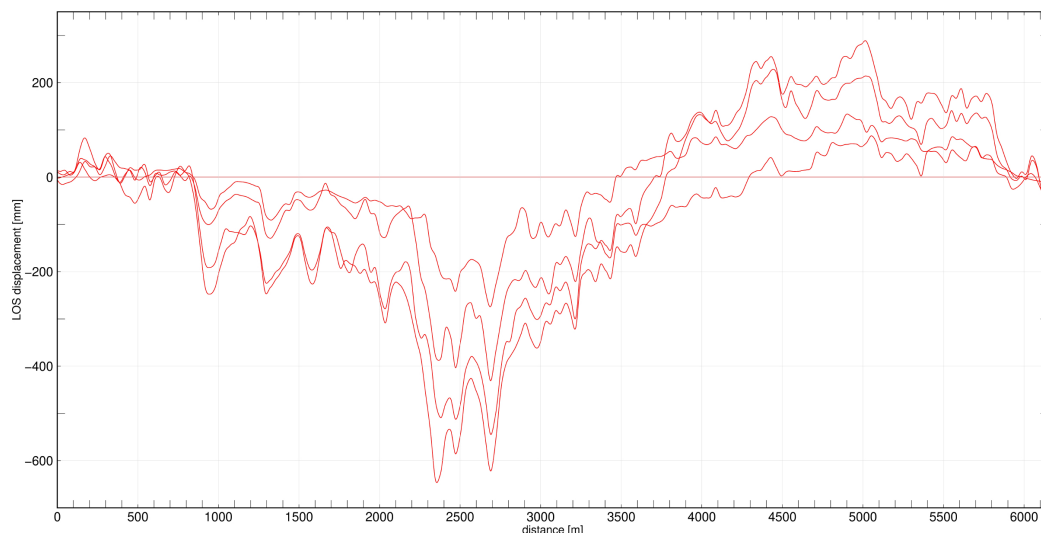
W (O7) wykazałem, że na podstawie przeprowadzonych obliczeń dla jednego roku (11.2015-11.2016) interferometria radarowa umożliwia monitorowanie wybranej powierzchni i detekcję ewentualnych przemieszczeń. Obliczone maksymalne osiadania na zwałowisku zewnętrznym osiągnęły wartość +43 cm/rok (rys. 11). Dodatkowo zidentyfikowałem obszar skarpy we wschodniej części wyrobiska, na którym zaobserwowałem istotne obniżenia. Na tych terenach nie były prowadzone prace obejmujące zdejmowanie nadkładu, eksploatację kopaliny lub zwałowanie, a obserwowane przemieszczenia wskazują na ich powolne obniżanie.

Otrzymane wyniki dostarczyły jeszcze jednej ważnej informacji. Na rysunku 12 zaprezentowałem przyrosty przemieszczeń wyznaczone na podstawie kolejnych danych SAR na profilu przechodzącym przez obszar odkrywki. Średni interwał między kolejnymi akwizycjami danych w tym przypadku wyniósł 12 dni. W wielu miejscach krzywe na wykresie reprezentujące przyrosty przemieszczeń nawzajem się przecinają. Dodatkowo ich przebieg miejscami jest nielogiczny. Z posiadanego przeze mnie w tamtym okresie doświadczenia wynikało, że taki stan rzeczy jest spowodowany wpływem przejścia sygnału przez atmosferę. Wpływ ten może istotnie oddziaływać na wyniki końcowe. Zesta-



Rys. 12: Przyrosty przemieszczeń LOS wyznaczone dla profilu zaznaczonym na rys. 11, średni interwał między kolejnymi wynikami wynosi 12 dni.

wiając przemieszczenia w dużo większych przedziałach czasu (rys. 13) można zauważyć, że przyrosty przemieszczeń są względem siebie są dużo bardziej spójne aniżeli w przypadku interwału 12 dni. W mojej ocenie jest to dowód na niekorzystny wpływ opóźnień atmosferycznych.



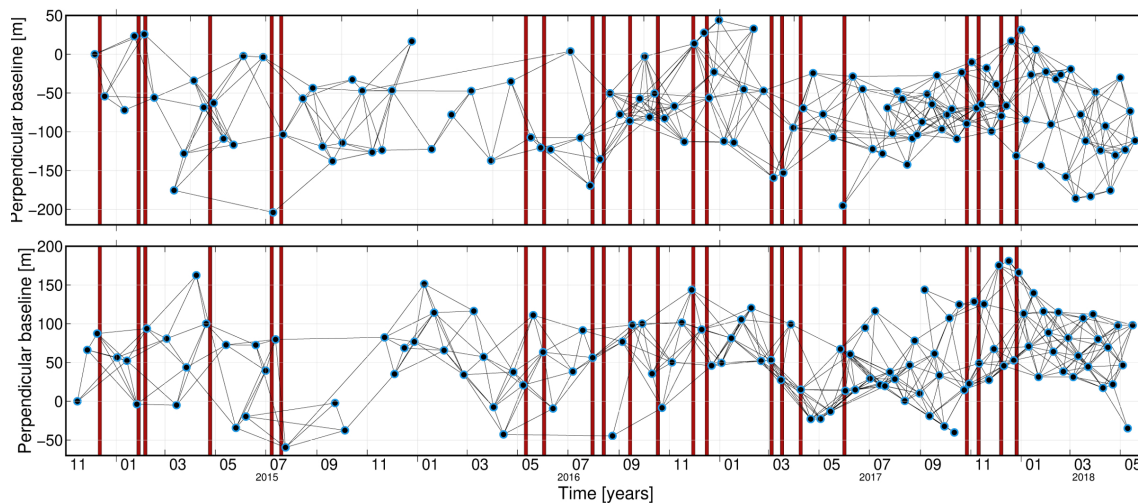
Rys. 13: Przyrosty przemieszczeń LOS wyznaczone dla profilu zaznaczonym na rys. 11, średni interwał między kolejnymi wynikami wynosi około 3 miesięcy.

### **LGOM**

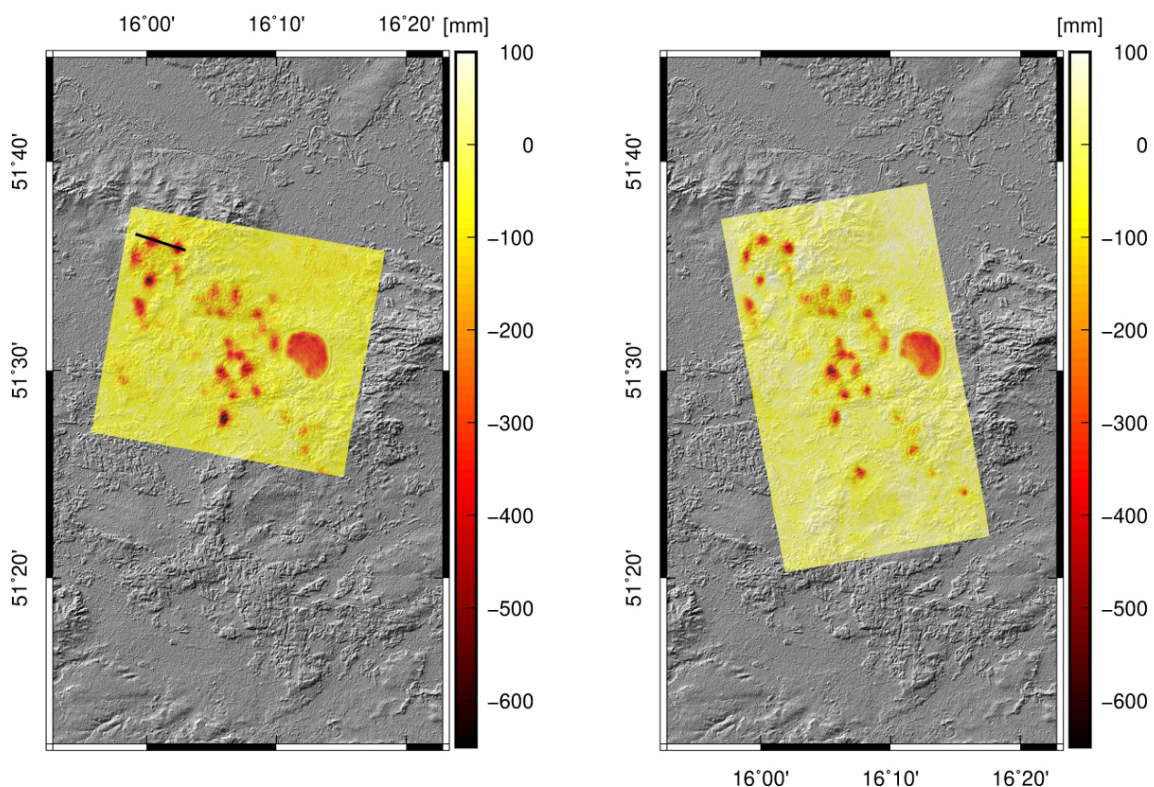
Kolejnym obszarem górniczym dla którego wyznaczyłem przemieszczenia powierzchni w oparciu o dane SAR z satelitów Sentinel 1A/B był obszar Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM). Podobnie jak w przypadku KWB Turów, również na obszarze LGOM do oceny wpływu podziemnej eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu wykorzystałem metodę SBAS. Otrzymane wyniki i ich analizę przedstawiłem m.in. w publikacji (**O3**). W odróżnieniu do wyników z KWB Turów obliczenia przeprowadziłem dla dwóch niezależnych zbiorów, pozyskanych z dwóch ścieżek: 22 oraz 79 (tab. 1, rys. 14). Istotnym był również zakres czasowy oraz liczba interferogramów obliczonych metodą SBAS. Analizowany okres obejmował cały dostępny zbiór danych radarowych - okres od listopada 2014 roku do maja roku 2018. W obliczeniach uwzględniłem wszystkie dostępne akwizycje danych radarowych. Dzięki temu możliwym było przeanalizowanie przemieszczeń z najkrótszym interwałem czasowym - sześć dni.

Tab. 1: Podstawce informacje na temat wykorzystanych w obliczeniach danych SAR (O1).

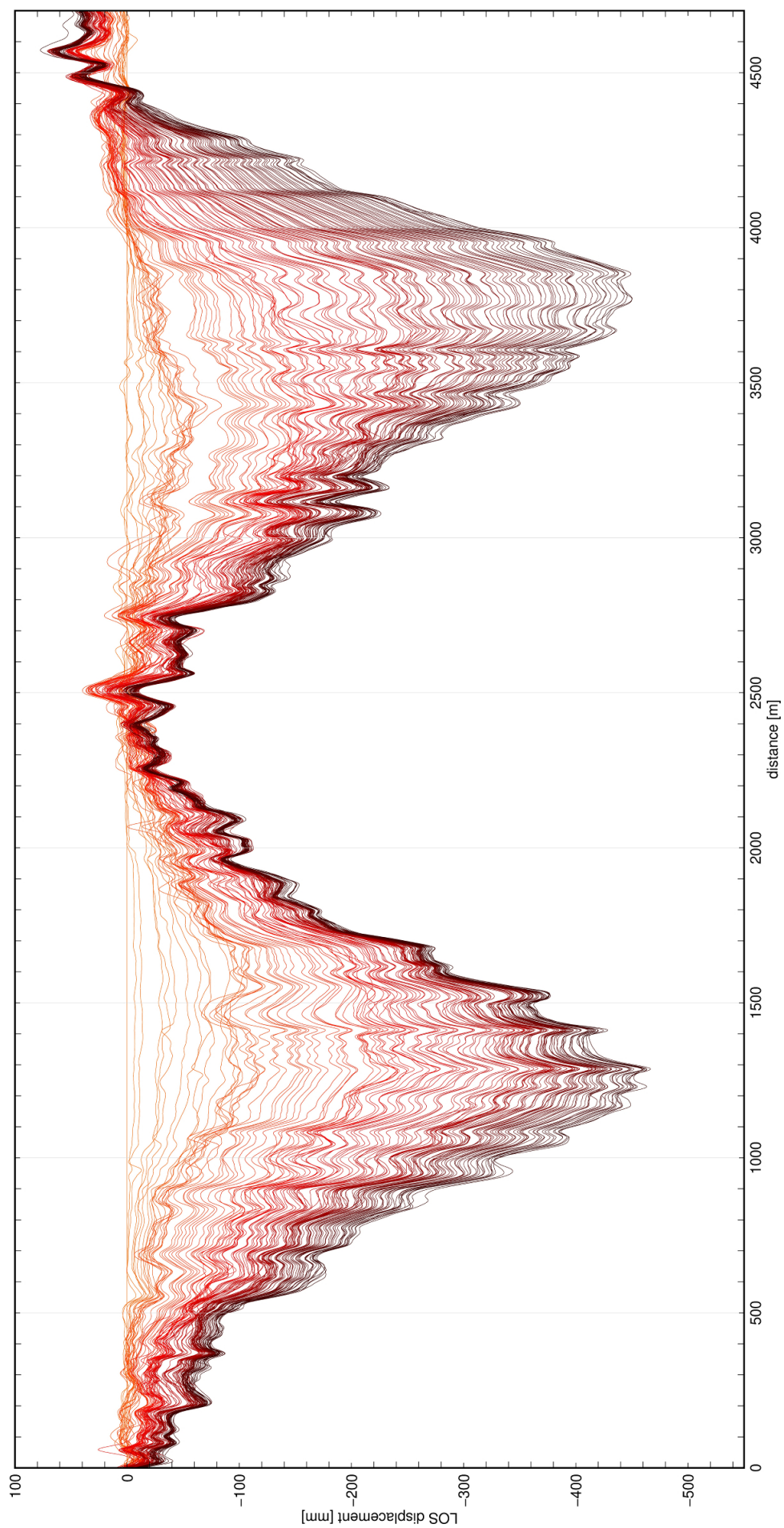
ścieżka	22	73
satelita	Sentinel 1A/1B	Sentinel 1A/1B
liczba obrazowań	123	122
przedział czasowy	06/12/2014 ÷ 19/05/2018	15/11/2014 ÷ 15/05/2018
liczba intererogramów	420	436



Rys. 14: Bazy przestrzenne dla dwóch wykorzystywanych zbiorów danych SAR pochodzących z ścieżki 22 (górny wykres) oraz 73 (dolny wykres). Analizowany okres obejmował lata 2014 – 2018. Czerwonymi pionowymi liniami zaznaczono zaobserwowane indukowane zdarzenia sejsmiczne o sile większej niż Mw 3.9 (O1)



Rys. 15: Wyniki obliczeń przemieszczeń LOS dla obszaru LGOM z dwóch ścieżek 22 (prawa) oraz 73 (lewa). Na rysunku zaprezentowano sumaryczne przemieszczenia LOS dla analizowanego okresu, czarna linia na lewej mapie reprezentują przebieg profilu dla którego sporządziłem wykres przemieszczeń (rys. 16) (O1).



Rys. 16: Osiadania terenu wyznaczone dla wybranego profilu (zaznaczony na rys. 15). Kolejne krzywe reprezentują przyrosty przemieszczeń z sześciominutowym interwałem (01).



Obliczenia danych Sentinel 1A/B metodą SBAS pozwoliły na zidentyfikowanie 27 rejonów (rys. 15) gdzie wpływ podziemnej eksploatacji oddziałuje na powierzchnię terenu. Przedstawione przeze mnie wyniki dla całego analizowanego okresu jednoznacznie pokazują, że wpływ podziemnej eksploatacji na powierzchnię ma jednostajny w czasie charakter. Analizując przemieszczenia można zauważyć rejonów gdzie kolejne krzywe przecinają się. Miejscami, szczególnie tam gdzie obserwowane osiadania są niewielkie przyrosty osiadań są niespójne. Jednakże w większej części wykresów kolejne krzywe przebiegają podobnie do poprzednich z określonym odstępem (rys. 16). W stosunku do wyników z KWB Turów, wyniki z obszaru LGOM charakteryzują się dużo lepszą jakością. W mojej ocenie stanowi to podstawę do stwierdzenia przydatności danych SAR oraz metody do monitorowania tego typu zjawisk na powierzchni terenu.

### **Podsumowanie**

Przedstawione przeze mnie wyniki prac dla obszarów pogórnicych i górniczych pokazały możliwości zastosowania satelitarnej interferometrii radarowej na tego typu obszarach. Zaprezentowane wyniki zarówno dla wałbrzyskiego obszaru pogórnicych jak również dla KWB Turów oraz LGOM stanowią istotny wkład w zakresie wykorzystania satelitarnej interferometrii radarowej na terenach górniczych i pogórnicych. Wspólnym mianownikiem w odniesieniu do ww. obszarów jest pokazanie, że dane SAR przy obecnym stanie wiedzy mogą stanowić istotne źródło dodatkowych informacji na temat wpływu eksploatacji górniczej na powierzchnię.

Z drugiej jednak strony, przeprowadzone przeze mnie obliczenia pokazały, że w przypadku stosunkowo niewielkich w czasie przemieszczeniach wyniki bazujące na metodach InSAR mogą być obciążone istotnymi błędami. Zgodnie z równaniem (1) błędy które można odseparować z fazy interferometrycznej to błędy związane z przejściem sygnału przez jonosferę oraz troposferę. Z tego względu pozycja (O3) z cyku publikacji dotyczy min. estymacji opóźnień atmosferycznych i w mojej ocenie stanowi istotny wkład w tym zakresie.

### **Opracowanie sposobu jednoczesnej estymacji wpływu opóźnień: troposferycznej i jonosferycznej w obliczeniach danych SAR**

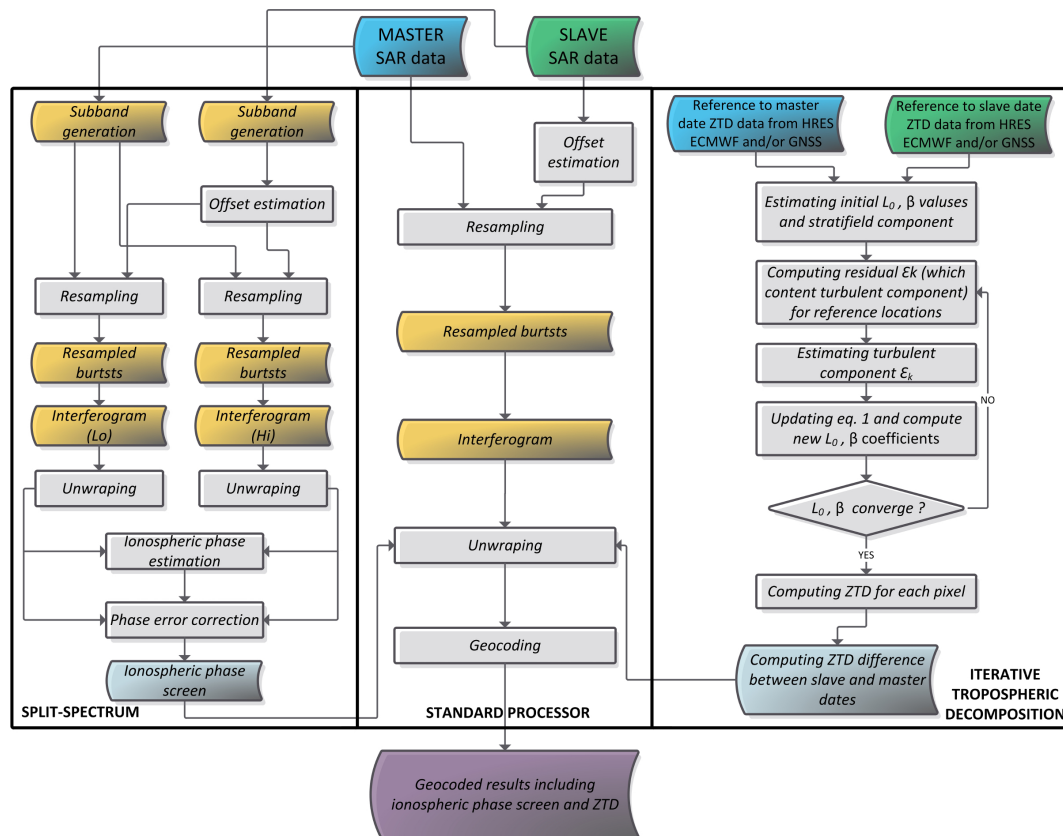
Przedstawione przeze mnie wyniki obliczeń przemieszczeń pokazały, że opóźnienie atmosferyczne w fazie interferometrycznej może mieć istotny wpływ na wyniki końcowe. Szczególnie odnosi się to do niedużych, w sensie przestrzennym i amplitudy zmian na powierzchni. Podobnie jak inne metody pomiarowe, również metody InSAR: DInSAR, PSInSAR czy SBAS mają swoje istotne ograniczenia (Bürgmann i in., 2000). W wprowadzeniu napisałem, że składowe topograficzna oraz błędy orbit w fazie interferometrycznej można wyznaczyć i odseparować. Natomiast opóźnienie atmosferyczne, na które składają się wpływy jonosfery oraz troposfery jest obecnie przedmiotem intensywnych badań. Niejednokrotnie wpływ przejścia sygnału przez atmosferę uniemożliwia wykrycie szukanych deformacji. W innych przypadkach obraz atmosferyczny skutecznie zniekształca uzyskiwane wyniki i uniemożliwia przeprowadzenie ich wiarygodnej analizy. Z tego względu czasowo-przestrzenna zmienność warunków atmosferycznych ma najistotniejszy wpływ na dokładność pomiarów wykonywanych metodami InSAR.

Publikacja (O3) jest efektem moich prac badawczych, które rozpocząłem w momencie prowadzenia obliczeń dla rejonu wałbrzyskiego, KWB Turów, Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego, KWK Bogdanki oraz LGOM. W przytoczonych wcześniej publikacjach wykazałem, że wyniki obliczeń InSAR mogą być istotnie zniekształcone ze względu na przejście sygnału przez jonosferę i troposferę. Był to główny powód mojego zainteresowania się sposobami i metodami wyznaczania składowych: troposferycznej i jonosferycznej z fazy interferogramu. Przeprowadzone studium literatury pokazało (rozdział 2 w publikacji O3), że istnieje duża liczba pozycji w których prezentowane są metody eliminacji ww. składowych. Słabym ich punktem jest fakt, że w większości przypadków pozycje te dotyczą estymacji jednego z dwóch ww. opóźnień. Jednocześnie nie ma praktycznie żadnych pozycji które prezentowałyby wyznaczanie opóźnień na terenach górniczych i pogórnicych. Braki w tym zakresie stanowiły punkt wyjścia dla moich dalszych prac badawczych.

Zaproponowane przeze mnie podejście jest zupełnie nowe i polega na jednoczesnym uwzględnieniu poprawki troposferycznej oraz jonosferycznej w obliczeniach danych SAR opartych na metodzie różnicowej (DInSAR). Nowe podejście wynika z połączenia dwóch metod:

- Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR (GACOS) (Yu i in., 2017, 2018) - dla wyznaczenia opóźnienia troposferycznego,
- Split-Spectrum (Rosen i in., 2010; Brcic i in., 2010; Gomba i in., 2016) - dla wyznaczenia opóźnienia jonosferycznego.

Schemat implementacji Iterative Tropospheric Decomposition Model oraz Split – Spectrum Method dla danych Sentinel przedstawiłem na rysunku 17. Wyznaczenie opóźnień troposferycznej oraz jonosferycznej przebiega niezależnie. Uwzględnienie opóźnień odbywa po rozwinięciu fazy interferogramu bazowego, która następnie jest przeliczana na przemieszczenia LOS.



Rys. 17: Schemat implementacji Iterative Tropospheric Decomposition Model oraz Split – Spectrum Method w obliczeniach SAR metodą DInSAR (O3).

### Korekcja opóźnienia troposferycznego

Do redukcji wpływu troposfery wykorzystałem Generic Atmospheric Correction Model (GACOS), który jest oparty na modelu Iterative Tropospheric Decomposition Model, ITD. Model ITD wyznacza całkowite opóźnienie zenitalne (*zenith total delay, ZTD*) dla piksela  $k$  o wektorze współrzędnych  $x$  (2), na podstawie znanych wartości *ZTD* w punktach referencyjnych (HRES ECMWF i/lub GNSS). Opóźnienie wyznaczone jest w sposób iteracyjny, poprzez dekompozycję sygnału na składową stratygraficzną i turbulentną (3).

$$ZTD_k = S(h_k) + T(x_k) + \varepsilon_k \quad (2)$$

gdzie:  $S$  – stratygraficzny komponent opóźnienia troposferycznego, skorelowany z wysokością  $h$ ,  $T$  – komponent turbulentny i  $k$  – niezmodelowana część sygnału. Komponent stratygraficzny dla dowolnego piksela jest reprezentowany przez funkcję wykładniczą (4), wartości są interpolowane metodą inverse distance weighting (IDW).

$$S = L_0 e^{-\beta h} \quad (3)$$

gdzie:  $\beta$  jest współczynnikiem funkcji wykładniczej,  $L_0$  to stratygraficzny komponent opóźnienia na poziomie morza, powyższe współczynniki są wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów na

podstawie znanych wartości  $ZTD$ . Składowa turbulentna jest interpolowana na podstawie zmodyfikowanej metody IDW:

$$T = \sum_{i=1}^n w_{ui} T(x_i), \quad w_{ui} = d_{ui}^{-2} / \sum_{i=1}^n d_{ui}^{-2} \quad (4)$$

gdzie:  $u$  oraz  $i$  reprezentują odpowiednio: lokalizację, dla której wyznaczane jest  $T$  oraz lokalizację referencyjną o znanym  $T$ ,  $w_{ui}$  to waga opóźnienia  $T$ , współczynnik interpolacji, zależny od poziomej odległości między punktem interpolowanym, a referencyjnym  $d_{ui}$ .

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \dots \\ T_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & 0 & \dots & w_{2n} \\ \dots & \dots & 0 & \dots \\ w_{n1} & \dots & w_{n,n-1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

Przy pierwszej iteracji w równaniu (3) składowa turbulentna przyjmuje wartość zero, a opóźnienie nią spowodowane jest zawarte w niemodelowanej części sygnału  $k$ . Komponent turbulentny jest wyznaczany niezależnie z niemodelowanej części sygnału na podstawie równania (6) z uwzględnieniem wag z wzoru (5). Wyznaczoną składową turbulentną wprowadza się do równania (3) i ponownie wyznacza współczynniki  $\Delta\phi_L$  i  $\Delta\phi_H$ . Jest proces iteracyjny kontynuowany tak długo, dopóki współczynniki  $L_0$  i  $\beta$  nie osiągną określonej wartości

### Korekcja opóźnienia jonosferycznego

Fazę interferometryczną można opisać równaniem (6) w którym można wyróżnić komponenty dyspersyjnych i niedyspersyjnych.

$$\Delta\phi = \underbrace{\frac{4\pi f_0}{c} (\Delta r_{topo} + \Delta r_{defo} + \Delta r_{tropo})}_{non-dispersive} - \underbrace{\frac{4\pi K}{c f_0} \Delta TEC}_{dispersive} \quad (6)$$

gdzie:  $f_0$  to częstotliwość fali,  $\Delta r_{topo}$ ,  $\Delta r_{defo}$  i  $\Delta r_{tropo}$  to kolejno składowe topograficzna, deformacyjna oraz opóźnienie troposferyczne,  $K$  jest stałą i wynosi  $40.28 \frac{m^3}{s^2}$ ,  $\Delta TEC$  jest różnicą  $TEC$  pomiędzy dwoma zobrazowaniami.

Jonosfera w odróżnieniu od troposfery jest ośrodkiem dyspersyjnym. Dzięki temu możliwe jest wyodrębnienie składowej jonosferycznej od reszty sygnału (6).

$$\begin{aligned} \Delta\phi_L &= \Delta\phi_{non-disp} \frac{f_L}{f_0} + \Delta\phi_{iono} \frac{f_L}{f_0} \\ \Delta\phi_H &= \Delta\phi_{non-disp} \frac{f_H}{f_0} + \Delta\phi_{iono} \frac{f_H}{f_0} \end{aligned} \quad (7)$$

przekształcając równanie 7, dla interferogramów z obu podzakresów, można utworzyć równania (8) będące sumą komponentów dyspersyjnych  $\Delta\phi_{iono}$  i niedyspersyjnych  $\Delta\phi_{non-iono}$ :

$$\begin{aligned} \Delta\hat{\phi}_{iono} &= \frac{f_L f_H}{f_0 (f_H^2 - f_L^2)} (\Delta\phi_L f_H - \Delta\phi_H f_L) \\ \Delta\hat{\phi}_{non-disp} &= \frac{f_0}{(f_H^2 - f_L^2)} (\Delta\phi_H f_H - \Delta\phi_L f_L) \end{aligned} \quad (8)$$

Implementacja zaproponowanej przeze mnie metody dotyczy obliczeń SAR metodą różnicową (DInSAR). Chcąc pokazać wpływ redukcji opóźnień atmosferycznych wybrałem trzy indukowane zdarzenia sejsmiczne z obszaru LGOM. Z racji tego, że satelity Sentinel 1A/B pracują na fali w paśmie C, które jest dużo bardziej "odporne" na wpływ jonosfery aniżeli np. fala w paśmie L (GNSS) jako dodatkowy przykład wykorzystałem dane z satelity ALOS-1 operującym w paśmie L. Dane z ALOS-1 czasowo obejmowały serię trzęsień ziemi które wystąpiły u wybrzeży Chile w 2010 roku.

Zarówno wstrząsy górnicze jak również naturalne trzęsienia ziemi można zaobserwować w fazie interferogramu o ile są wystarczająco silne oraz o ile na powierzchni dochodzi do trwałych przemieszczeń. Wobec powyższego przeanalizowałem trzy indukowane zdarzenia sejsmiczne (tab. 2),

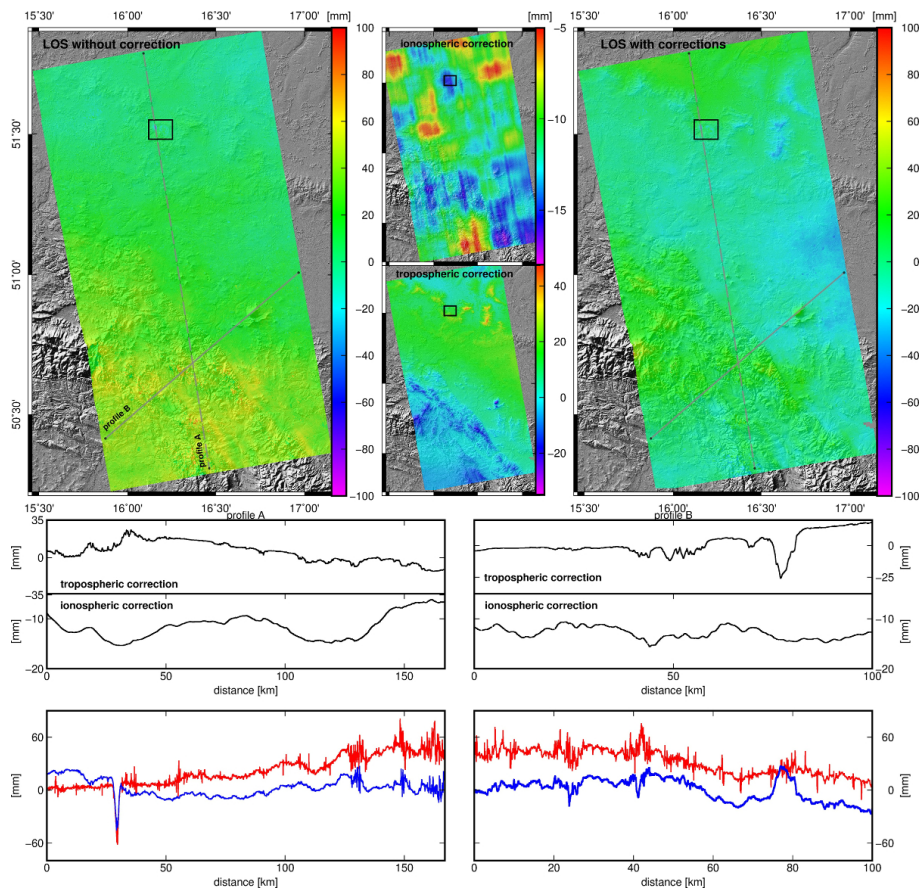
Tab. 2: Podstawowe informacje dotyczące wykorzystywanych w obliczeniach danych SAR (**O3**).

Date and time of event (UTC)	type	strength [ $M_w$ ]	event location	satellite	master Date and time (UTC)	slave Date and time (UTC)	path
11/29/2016 8:09:39 PM	Induced tremor	4.2	Poland, the LGCB region	Sentinel 1A	11/28/2016 4:43:20 PM	12/10/2016 4:43:20 PM	73
12/7/2017 5:42:50 PM	Induced tremor	4.5		Sentinel 1A/1B	12/5/2017 4:43:33 PM	12/11/2017 4:42:51 PM	
1/29/2019 12:53:45 PM	Induced tremor	4.1		Sentinel 1A/1B	1/26/2019 5:09:03 AM	2/1/2019 5:08:27 AM	22
3/11/2010 2:55:27 PM	Natural earthquake	7.0	Chile, Cardenal Caro province	ALOS 1	3/9/2010 4:03:29 AM	4/24/2010 4:03:06 AM	114
					3/9/2010 4:03:03 AM	4/24/2010 4:03:15 AM	

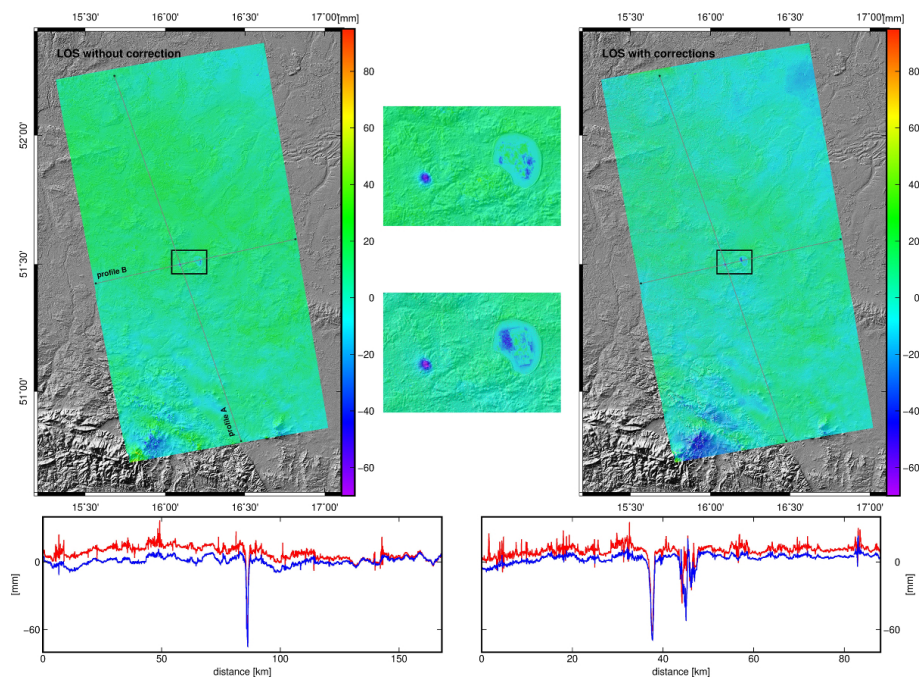
które wystąpiły w 2016 (rys. 18), 2017 (rys. 19) oraz w 2019 (rys. 20) roku. Każdy z wstrząsów miał magnitudę większą niż  $M_w$  4.0.

Detekcja wpływu wstrząsu górniczego jest przedmiotem trzeciego celu szczegółowego przedstawionego w dalszej części autoreferatu.

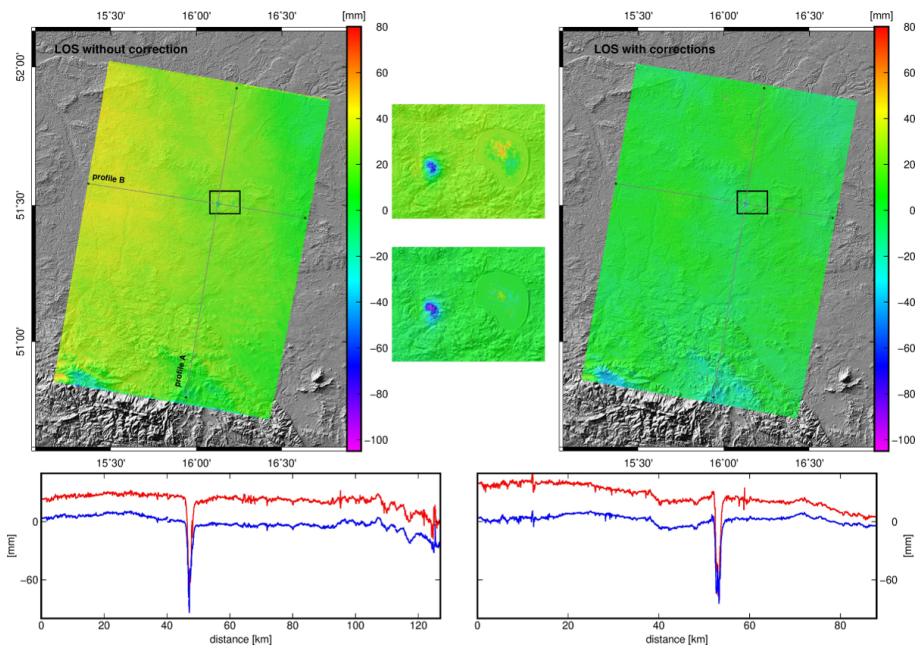
Zgodnie z zaproponowanym schematem obliczeniowym (rys. 17) dla każdej pary SAR obliczyłem różnicę opóźnienia troposferycznego bazując na modelu *ITD*. Zakres opóźnienia dla analizowanego obszaru LGOM w kolejnych okresach wynosił odpowiednio [mm]: -31/54 (2016), -4/27 (2017) oraz -22/10 (2019). Analizując zmiany zaobserwowane na profilach stwierdziłem, że uwzględnienie opóźnienia atmosferycznego istotnie poprawiło wyniki końcowe. Po uwzględnieniu opóźnienia jonosferycznego i troposferycznego zauważyłem dwie zasadnicze zmiany. Po pierwsze znacząco zmniejszyły się lokalne wahania przemieszczeń. Przemieszczenia na analizowanych profilach mają złagodzony przebieg. Po drugie, na podstawie zestawienia (rys. 21) można zauważyć, że poprawka jonosferyczna znacząco niweluje lokalne wahania. Uwzględnienie jej najlepiej pokazuje zestawienie przemieszczeń dla pierwszego analizowanego okresu (LGOM, 2016). Najmniejszy udział poprawki zaobserwowałem w przypadku wstrząsu indukowanego z 2017 oraz trzęsienia ziemi z 2010 roku. Przykłady z obszaru LGOM pokazują, że globalny (tzn. w całym analizowanym zakresie - długości profilu) udział poprawki jonosferycznej jest dużo mniejszy w zestawieniu z wartościami poprawki troposferycznej. Uwzględnienie wpływu troposfery poprawia wyniki przemieszczeń w taki sposób, że de facto są „obrazem” wyjściowych przemieszczeń (z zminimalizowanymi lokalnymi wahaniami) transformowanych o pewien pionowy wektor. Jest to bardzo dobrze widocznie w przypadku zdarzenia z 2017 roku oraz trzęsienia z 2010 roku.



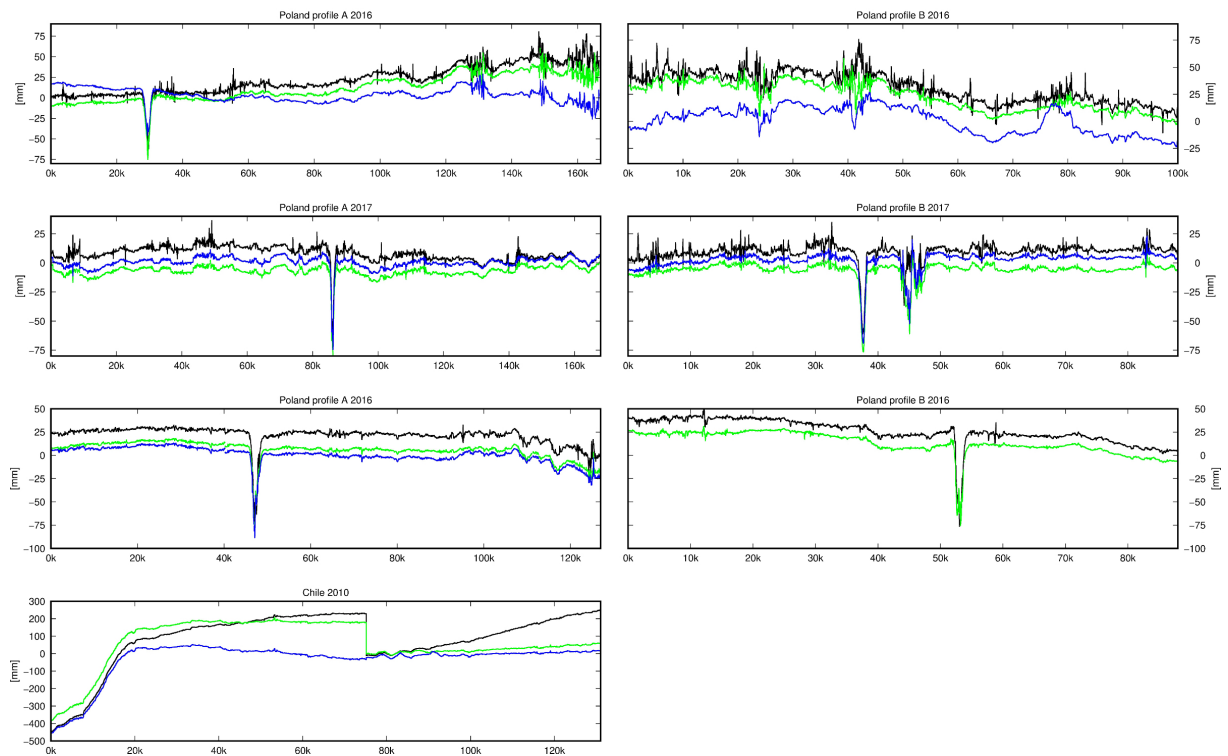
Rys. 18: Zestawienie wyników dla wstrząsu z 2016. Przesunięcia LOS obliczone metodą DInSAR (Sentinel 1, TOPS) dla okresu 2016/11/28-2016/12/10 (lewa część), wyznaczone: składowa jonosferyczna (środkowy górny), składowa troposferyczna (środkowy dolny) oraz przesunięcia LOS uwzględniające ww. składowe. Linia czerwona reprezentuje przesunięcia bez uwzględnienia poprawek, a niebieska z poprawkami (O3).



Rys. 19: Zestawienie wyników dla wstrząsu z 2017 roku, przesunięcia LOS obliczone metodą DInSAR (Sentinel 1, TOPS) dla okresu 2017/12/05-2017/12/11 (lewa część), oraz przesunięcia LOS uwzględniające wpływ jonosfery i troposfery (prawa część). Linia czerwona reprezentuje przesunięcia bez uwzględnienia poprawek, a niebieska z poprawkami (O3).



Rys. 20: Zestawienie wyników dla wstrząsu z 2019 roku, przemieszczenia LOS obliczone metodą DInSAR (Sentinel 1, TOPS) dla okresu 2019/01/26-2019/02/01 (lewa część), oraz przemieszczenia LOS uwzględniające wpływ jonosfery i troposfery (prawa część). Linia czerwona reprezentuje przemieszczenia bez uwzględnienia poprawek, a niebieska z poprawkami (O3).



Rys. 21: Zestawienie zmienności przemieszczeń obserwowanych na profilach. Linia czarna odnosi się do danych oryginalnych, zielona – wyniki uwzględniające poprawkę jonosferyczną, niebieska – wyniki uwzględniające zarówno poprawkę jonosferyczną jak i troposferyczną (O3).

## Wykazanie możliwości zastosowania metod InSAR w detekcji indukowanych zdarzeń sejsmicznych na terenach górniczych

Artykuły (**O1** oraz **O2**) dotyczą zastosowania metod DInSAR oraz SBAS w śledzeniu wpływu wstrząsów górniczych na powierzchnie.

Dotychczasowe doświadczenia pokazują, że satelitarna interferometria radarowa może być z powodzeniem stosowana w badaniach wpływu trzęsień ziemi (skala regionalna) na powierzchnię (Tong i in., 2013; Tung i Masterlark, 2016). Jest także stosowana w ocenie aktywności uskoków tektonicznych (Chaussard i in., 2014; Hussain i in., 2016) oraz aktywności wulkanicznej (Henderson i Pritchard, 2013; Remy i in., 2015; González i in., 2015). Czynniki, które mają wpływ na indukowane zdarzenia sejsmiczne to: głębokość eksploatacji, rodzaj systemu eksploatacji, a także warunki geologiczne i górnicze (Gibowicz i Kijko, 1994). Genezą wstrząsów górniczych jest nakładanie się naprężeń eksploatacyjnych, tektonicznych oraz naprężeń litostatycznych. Naprężenia te powodują wzrost energii potencjalnej w górotworze. W momencie przekroczenia wartości wytrzymałości skał następuje zniszczenie górotworu i gwałtowne uwolnienie nagromadzonej energii potencjalnej. Wstrząsy górotworu towarzyszące eksploatacji górniczej występują w wielu zagłębiach górniczych na całym świecie, np. w Wielkiej Brytanii (Kuszniir i in., 1980), w Niemczech (Bischoff i in., 2010), w Republice Południowej Afryki (Riemer i Durrheim, 2012), Stanach Zjednoczonych (Kubacki i in.), Chinach (Wang i in., 2015) w Polsce (Drzewiecki i Piernikarczyk, 2017). Zagrożenia związane z wstrząsami górniczymi należą do najpoważniejszych zagrożeń towarzyszących eksploatacji górniczej. W Polsce powstawanie zjawisk sejsmicznych, czyli wstrząsów górniczych, związane jest z prowadzeniem eksploatacji w podziemnych kopalniach GOP i LGOM oraz w odkrywkowej kopalni węgla brunatnego - KWB Bełchatów. Wystąpienie wstrząsu górniczego może doprowadzić do powstania trwałych zmian na powierzchni terenu. Zmiany te mogą przybierać formę lokalnych obniżzeń terenu lub deformacji nieciągłych w postaci spękań, zapadlisk, progów itp. Wielkości powstałych zmian na powierzchni mierzona jest z wykorzystaniem tradycyjnych pomiarów geodezyjnych oraz pomiarów GNSS. Niemniej jednak w ostatnich latach podjęto także próby wykorzystania satelitarnych danych radarowych do detekcji tego typu zjawisk na powierzchni (Malinowska i in., 2018; Milczarek, 2019).

W artykule (**O2**) podjąłem próbę wykorzystania satelitarnej interferometrii radarowej do określenia zmian powierzchni w rejonie wystąpienia silnego indukowanego wstrząsu sejsmicznego wywołanego podziemną eksploatacją górniczą. Przeanalizowałem wstrząs który miał miejsce 29 listopada 2016 na obszarze LGOM. Założyłem, że satelitarne dane radarowe pochodzące z satelitów Sentinel 1A/B mogą być wykorzystywane do monitorowania sejsmiki indukowanej - wstrząsów górniczych. Wstrząsy tego rodzaju występują na dużo mniejszych głębokościach, a ich zasięg przestrzenny na powierzchni terenu jest o wiele mniejszy niż ma to miejsce w przypadku naturalnych zjawisk sejsmicznych.

W pierwszej kolejności przeprowadziłem analizę wpływu wstrząsu górniczego w oparciu o dane radarowe pochodzące z satelitów Sentinel 1A oraz 1B (tab. 3, rys. 22). Ze względu na fakt, że w rejonie

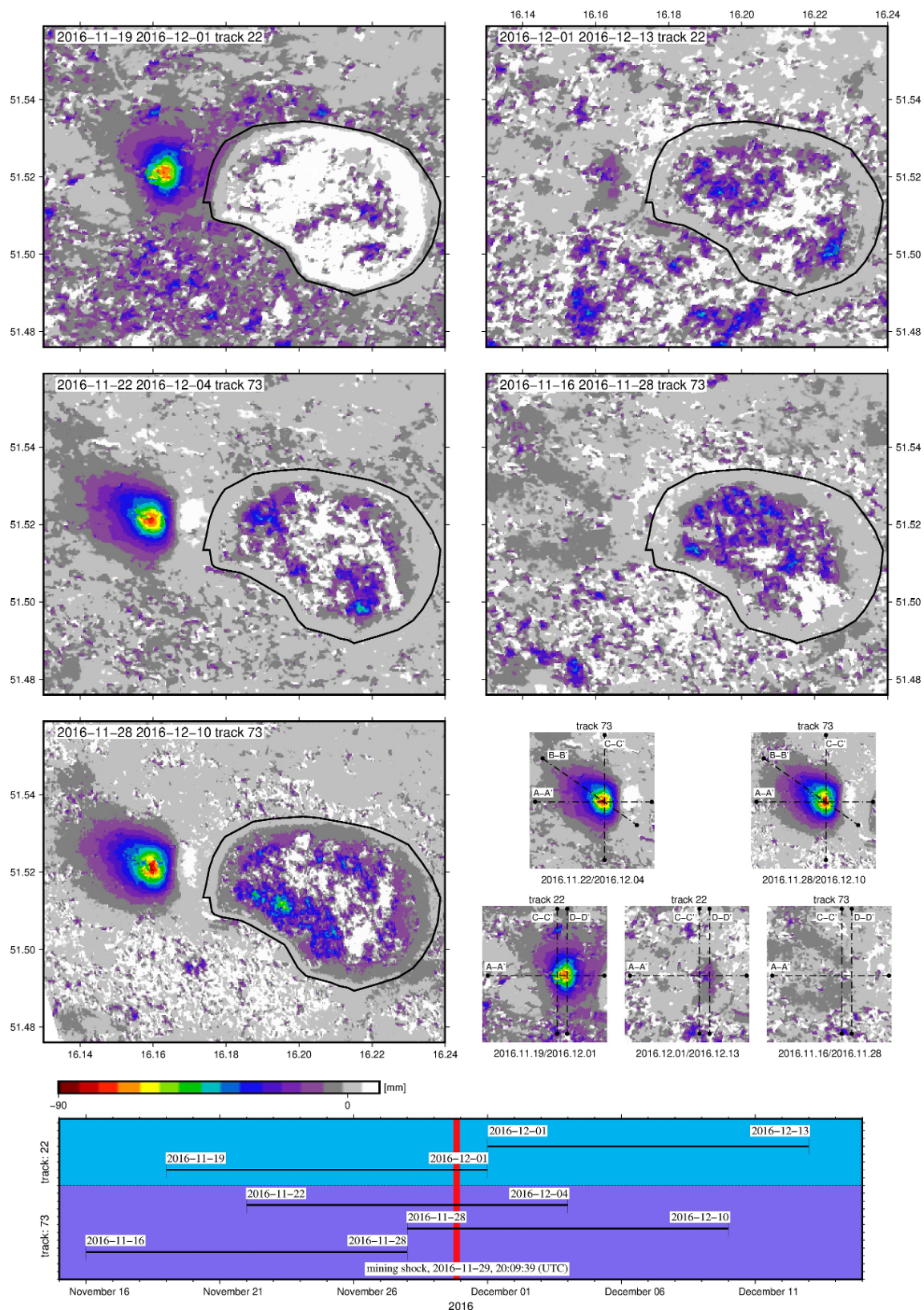
Tab. 3: Wykorzystane interferogramy w analizie wstrząsu górniczego z dnia 28 Nov 2016\* wraz z podaniem podstawowych informacji (**O2**).

Ścieżka nr.	Satelita	Dane przed/ czas akwizycji (UTC)**	Repeat Date Product/ czas akwizycji (UTC)**	Kierunek	Baza (m)	Średnia koherencja
22	Sentinel 1B	19.11.2016/05:08:34	01.12.2016/05:08:34	Descending	127	0.37
22	Sentinel 1B	01.12.2016/05:08:34	13.12.2016/05:08:34	Descending	14	0.29
73	Sentinel 1A	16.11.2016/16:38:23	28.11.2016/16:38:23	Ascending	42	0.35
73	Sentinel 1A	28.11.2016/16:38:23	10.12.2016/16:38:23	Ascending	-51	0.44
73	Sentinel 1B	22.11.2016/16:38:25	04.12.2016/16:38:25	Ascending	-6	0.41

\* analizowany wstrząs wystąpił o godzinie 20:09:39 UTC

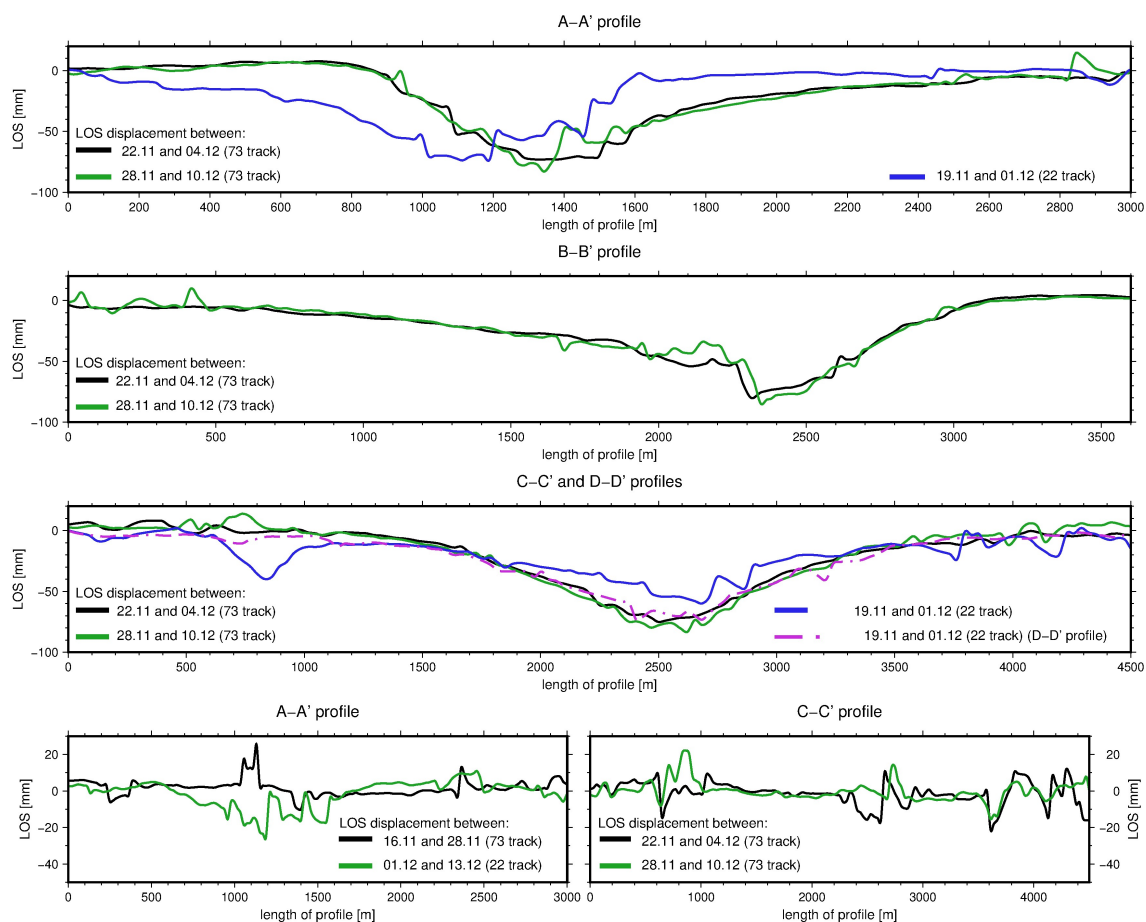
\*\* Czas akwizycji oznacza w tym przypadku zakończenie akwizycji danych dla IW2 sub-swath, średni czas pomiaru dla całego IW2 przypadku wykorzystywanych zobrażeń SAR wynosił 31 s.

wystąpienia wstrząsu prowadzona jest eksploatacja rud miedzi zdecydowałem się na przeprowadzenie dodatkowych obliczeń wykorzystując metodę szeregów czasowych SBAS. Okres obliczeń objął cały 2016 rok. Wykorzystałem łącznie 27 zobrażeń SAR (Sentinel 1A oraz 1B) z ścieżki nr 73 (rys. 24). Średni okres pomiędzy kolejną akwizycją wyniósł 12 dni. Łączna liczba interferogramów



Rys. 22: Przemieszczenia LOS (mm) wyznaczone z kolejnych interferogramów. W przypadku pięciu głównych map w lewym górnym rogu każdej z nich umieszczono daty zobrazowań SAR na podstawie których obliczono przemieszczenia. Czarna obwiednia reprezentuje zbiornik odpadów poflotacyjnych Żelazny Most. Po prawej stronie zamieszczono lokalizację przebiegu kolejnych profili: A-A', B-B', C-C', D-D'. Dolna część rysunku przedstawia czasowy rozkład kolejnych interferogramów względem daty wstrząsu (czerwona pionowa linia) (O2).

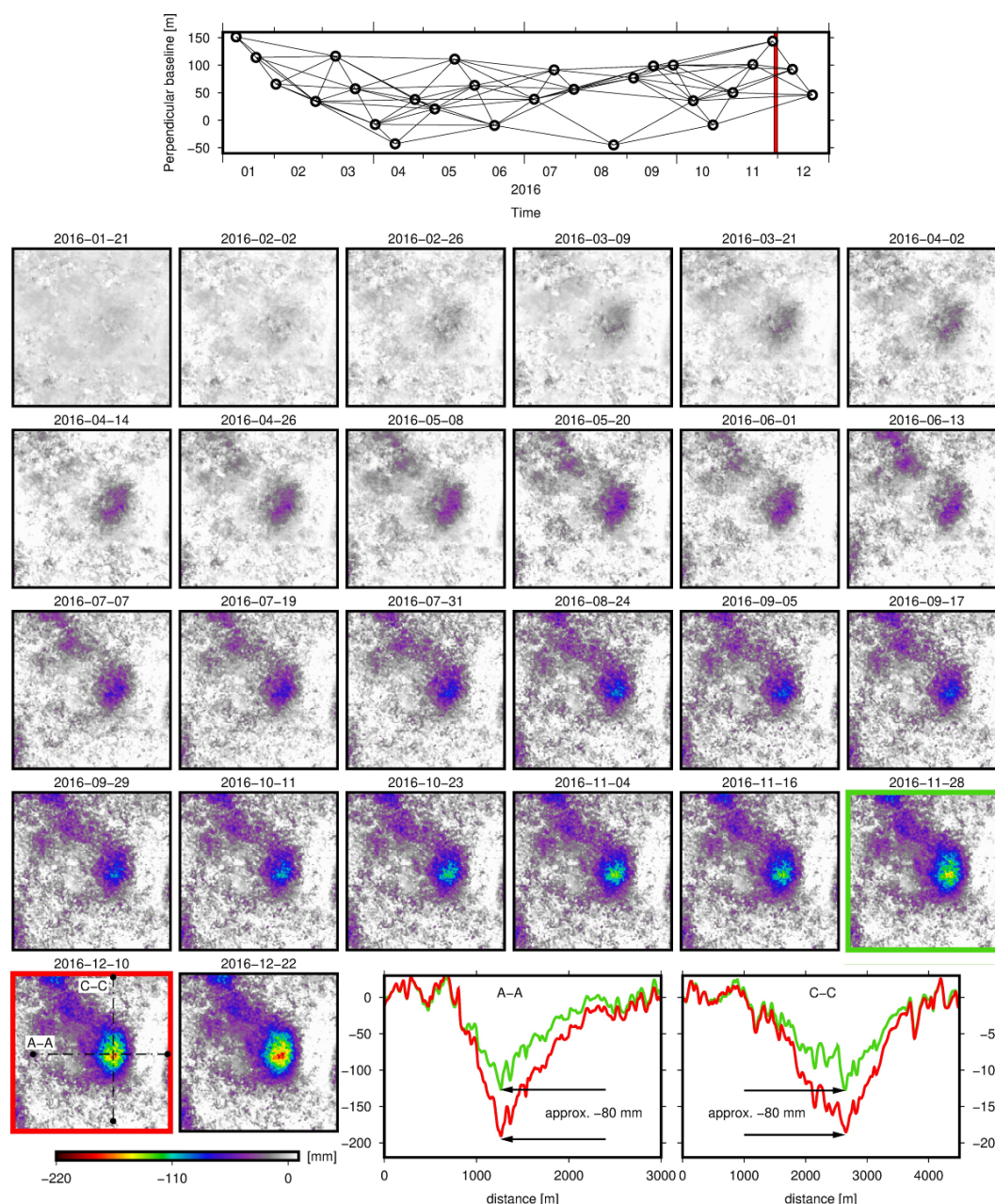




Rys. 23: Profil prezentujące krzywizny w rejonie obniżenia powstałego na skutek wstrząsu indukowanego. Profil A-A' jest zorientowany w kierunku E-W, B-B' w kierunku NW-SE, C-C' oraz D-D' w kierunku N-S. Przesunięcie profilu D-D' względem C-C' wynosi 445 m (O2).

wyniosła 78. Założyłem, że obliczenia metodą SBAS pozwolą na skorelowanie wpływów eksploatacji na powierzchnię z przemieszczeniami, które wystąpiły po analizowanym wstrząsie. Dodatkowo w obliczeniach metodą SBAS wykorzystałem empiryczny model redukcji wpływu atmosfery zaproponowany przez Tymofeyeva i Fialko (2015). Otrzymane metodą SBAS wyniki (rys. 24) wykazały, że w rejonie wstrząsu w okresie całego 2016 roku formowała się nieka obniżeniowa. W okresie pomiędzy 28 listopada a 10 grudnia nastąpiło gwałtowne w stosunku do całorocznej stałej dynamiki obniżania powierzchni terenu. Maksymalne obniżenie zaobserwowane na profilach A-A' oraz C-C' wyniosło w przybliżeniu wartość -80 mm (rys. 23). Otrzymane metodą SBAS wyniki są zbieżne z wcześniej przedstawionymi wynikami uzyskanymi metodą DInSAR. Przestrzenny zasięg wstrząsu pokrył się z zasięgiem istniejącej niecki obniżeniowej.

Otrzymane przeze mnie wyniki wykazały możliwość detekcji zmian powierzchni terenu w wyniku wystąpienia silnego wstrząsu górniczego (zdarzenie indukowane) bazując na danych radarowych pochodzących satelitów Sentinel 1A/B. Cechą wyróżniającą zaprezentowanych wyników odniesieniu do innych pozycji (Barnhart i in., 2014) jest zasięg wykrytych zmian. Uwzględniając dokładność wyznaczania przemieszczeń LOS można stwierdzić, że nie wystąpiły żadne przemieszczenia resztkowe. Obliczenia metodą SBAS jednoznacznie wykazały, że zaobserwowane przemieszczenia pokrywają się z nieką obniżeniową która jest związana z prowadzoną w tym obszarze podziemną eksploatacją rud miedzi. Na tej podstawie można wysunąć wniosek, że indukowany wstrząs potęguję deformacje powierzchni terenu w rejonie prowadzonej eksploatacji. Lokalizacja wstrząsu wystąpiła dokładnie w polu eksploatacyjnym XXI2 (oddział oddział G-23) co w mojej ocenie dodatkowo potwierdza indukowany charakter wstrząsu.



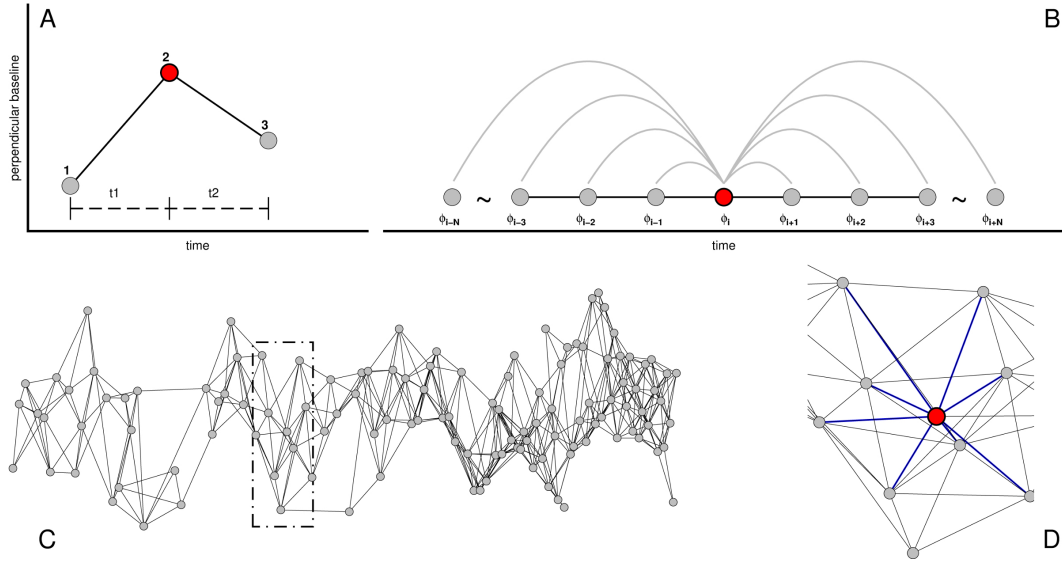
Rys. 24: Przemieszczenia LOS wyznaczone na obszarze analizowanego wstrząsu w oparciu o metodę SBAS. Na górze przedstawiono kombinację 78 interferogramów obliczonych dla całego 2016 roku. Czerwona barwa oznaczona datę wstrząsu. Kolejne przemieszczenia LOS w 2016 roku zaprezentowane na 26 okresach. Mapy z obwiednią zieloną i czerwoną oznaczają okresy bezpośrednio przed i po wstrząsie z listopada 2016 roku. Wykresy przedstawia przemieszczenia dla tych samych przekrojów (A-A oraz C-C) co w przypadku obliczeń metodą DInSAR (O2).

Kontynuacja badań nad wykorzystaniem danych SAR w detekcji wpływu wstrząsów górniczych na powierzchnię zaowocowała powstaniem artykułu (O1), który jest ostatnią pozycją w cyklu jednotematycznych publikacji. Manuskrypt ten jest również podsumowaniem moich badań związanych z zastosowaniem metod InSAR w detekcji indukowanych zdarzeń sejsmicznych na terenach górniczych.

Głównym celem badań zaprezentowanych w pozycji (O1) było sprawdzenie, czy satelitarna interferometria radarowa może być z powodzeniem stosowana do długookresowych analiz przemieszczeń powierzchni terenu górniczego. Jednocześnie przedstawiłem możliwość wykorzystania empirycznej metody estymacji opóźnień atmosferycznych opracowanej przez Tymofeyeva i Fialko (2015) do pośredniej detekcji indukowanych wstrząsów sejsmicznych.

Główne założenie metody Tymofeyeva i Fialko (2015) mówi, że dwa (lub więcej) interferogramy,

które mają wspólną scenę zawierają taką samą (pod względem wartości) składową atmosferyczną fazy wynikającą z propagacji fali w troposferze i jonosferze. Na rysunku 25 przedstawiłem podstawowe założenia metody.



Rys. 25: Graficzne przedstawienie podstawowych założeń metody. W części A przedstawiono dwie pary interferometryczne mające wspólne jedno zobrazenie (numer 2, na czerwono). W części B zaprezentowano ideę omawianej metody: im więcej par zobrażeń SAR w których wstępuje powtarzające się zobrazenie (czerwona) tym lepsze oszacowanie poprawki atmosferycznej dla tego (daty) zobrazenia. Część C przedstawia przestrzenno-czasowy rozkład analizowanych danych SAR z ścieżki 73. Z kolei część D przedstawia rzeczywistą implementację modelu. Części A i B na podstawie Tymofeyeva i Fialko (2015)(O1).

Załóżmy, że dysponujemy dwoma interferometrami, które zostały obliczone na podstawie trzech zobrażeń (w takim przypadku czasy akwizycji wynoszą odpowiednio  $t_1$ ,  $t_2$  i  $t_3$  - rys. 25). Dla każdego interferogramu równania fazy będą odpowiednio równe:

$$\Delta\phi_{12} = \Delta\tau_{12} + \alpha_2 - \alpha_1 + \varepsilon_{12} \quad \text{and} \quad \Delta\phi_{23} = \Delta\tau_{23} + \alpha_3 - \alpha_2 + \varepsilon_{23} \quad (9)$$

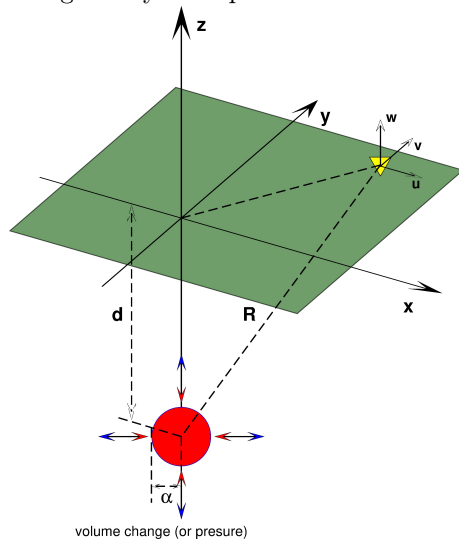
gdzie  $\alpha_i$  - składowa atmosferyczna wynikająca z propagacją sygnału m.in w troposferze i jonosferze w czasie  $t_i$ ,  $\Delta\tau_{ij}$  to składowa fazy, która dotyczy zaobserwowanych deformacji powierzchni terenu w czasie  $t_{ij}$ .

Wobec powyższego możliwe jest wyznaczenie składowej fazy, która jest odpowiedzialna za propagację sygnału w danym dniu (dniu akwizycji danych). W tym miejscu należy zdefiniować dodatkowe założenie mówiące, że równica  $\Delta\phi_{12} - \Delta$  nie jest zależna od składowej deformacyjnej pod warunkiem stałej bazy czasowej oraz niezmiennych w czasie przyrostów deformacji. To założenie jest kluczowe w przypadku zaprezentowanych wyników w artykule. Założenie to jest podobne do własności innych empirycznych metod eliminacji opóźnień atmosferycznych w obliczeniach InSAR (Bekaert i in., 2015). Uogólniony wzór na składową atmosferyczną ma postać (10):

$$\alpha_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N \Delta\phi_{i(i-j)} - \Delta\phi_{(i+j)i} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N} \sum_{j=0}^{N-1} (N-j) [\Delta\phi_{(i-j)(i-j-1)} - \Delta\phi_{(i+j+1)(i+j)}] \quad (10)$$

W celu sprawdzenia możliwości metody (Tymofeyeva i Fialko, 2015) wykonałem serię obliczeń testowych. Obliczenia metodą SBAS przeprowadziłem na teoretycznych danych, które przygotowałem wykorzystując model Mogi. Model ten jest modelem analitycznym, który opisuje wielkość i kierunek przemieszczeń powierzchni wynikających ze zmiany objętości lub ciśnienia pewnego punktu w jednorodnej elastycznej półprzestrzeni (rys. 26). Dzięki temu możliwe było zasymulowanie

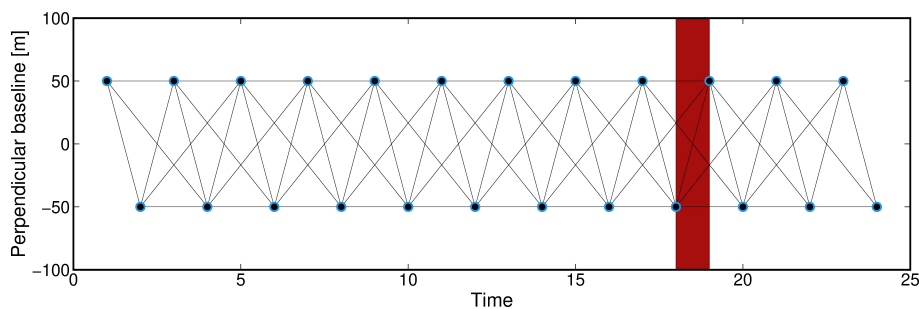
podziemnej eksploatacji, a także zasymulowaniu indukowanych wstrząsów sejsmicznych. Głównym celem zastosowania modelu Mogi oraz obliczeń testowych było sprawdzenie w jaki sposób empiryczny model estymacji opóźnień atmosferycznych wpłynie na wyniki przemieszczeń w przypadku wystąpienia indukowanego zdarzenia sejsmicznego. Mając na uwadze jedno z założeń modelu mówiące o stałych w czasie przemieszczeniach sprawdziłem czy w przypadku wystąpienia wstrząsu górniczego możliwe będzie wydobycie sygnału spowodowanego tym wstrząsem. Jeżeli tak, to model zaproponowany przez Tymofeyeva and Fialko mógłby być wykorzystywany do pośredniej określenia wpływów wstrząsów górniczych na powierzchnię. Detekcja wpływu wstrząsów górniczych w warunkach rzeczywistych na podstawie danych SAR jest niejednokrotnie ograniczona. Wynika to z faktu, że prowadzona na dużym obszarze intensywne podziemna eksploatacja (np. obszar LGOM) powoduje powstawanie licznych, lokalnych obniżień powierzchni – tzw. niecek obniżeniowych. W przeważającej większości przypadków wpływ wstrząsu górniczego jest obserwowany w granicach istniejących niecek obniżeniowych. Stanowi to dodatkowe utrudnienie w określaniu wpływu wstrząsów górniczych na powierzchnię.



$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \Delta V \frac{(1 - \nu)}{\pi} \begin{pmatrix} x/R^3 \\ y/R^3 \\ z/R^3 \end{pmatrix} \quad (11)$$

Rys. 26: Model Mogi (O1)

W obliczeniach testowych założyłem 24 okresy czasowe ( $t_1 \dots t_{24}$ ) pomiędzy którymi występowały jednakowe w czasie osiadania powierzchni terenu rzędu -40 mm wynikające z eksploatacji na głębokości 500 m. Interwał między okresami był stały. Rysunek 27 przedstawia przestrzenne i czasowe rozmieszczenie dla danych testowych. Obszar zasięgu testowych danych SAR obejmował 10x10 km.

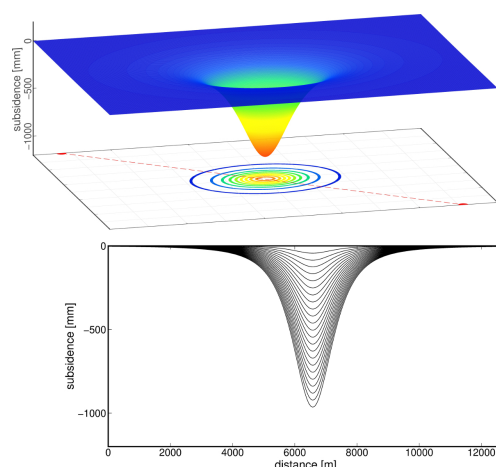


Rys. 27: Temporal and perpendicular baselines of the final selected pairs of hypothetical SAR datas (O1).

Obliczenia przeprowadziłem na trzech niezależnych przypadkach:

- I eksploatacja bez uwzględniania wstrząsu górniczego,
- II eksploatacja z uwzględnieniem wstrząsu górniczego zarejestrowanego pomiędzy  $t_{18}$  a  $t_{19}$ , przy czym wstrząs wystąpił dokładnie w centrum istniejącej niecki obniżeniowej,
- III eksploatacja z uwzględnieniem wstrząsu górniczego zarejestrowanego pomiędzy  $t_{18}$  a  $t_{19}$ , jednakże w przeciwieństwie do II przypadku, wstrząs wystąpił poza obszarem wpływu eksploatacji, był zlokalizowany w odległości około 3 km od centrum istniejącej niecki obniżeniowej.

W pierwszym przypadku, w którym nie uwzględniono wstrząsu maksymalne osiadania powierzchni wyniosły -969 mm. Z rysunku 28 prezentującego przyrosty osiadań wzdłuż wybranego profilu można zauważyć, że pomiędzy kolejnymi okresami następuje ich stały przyrost. Zgodnie oczekiwaniami nie obserwowane są żadne istotne wartości składowej atmosferycznej. W drugim analizowanym przy-

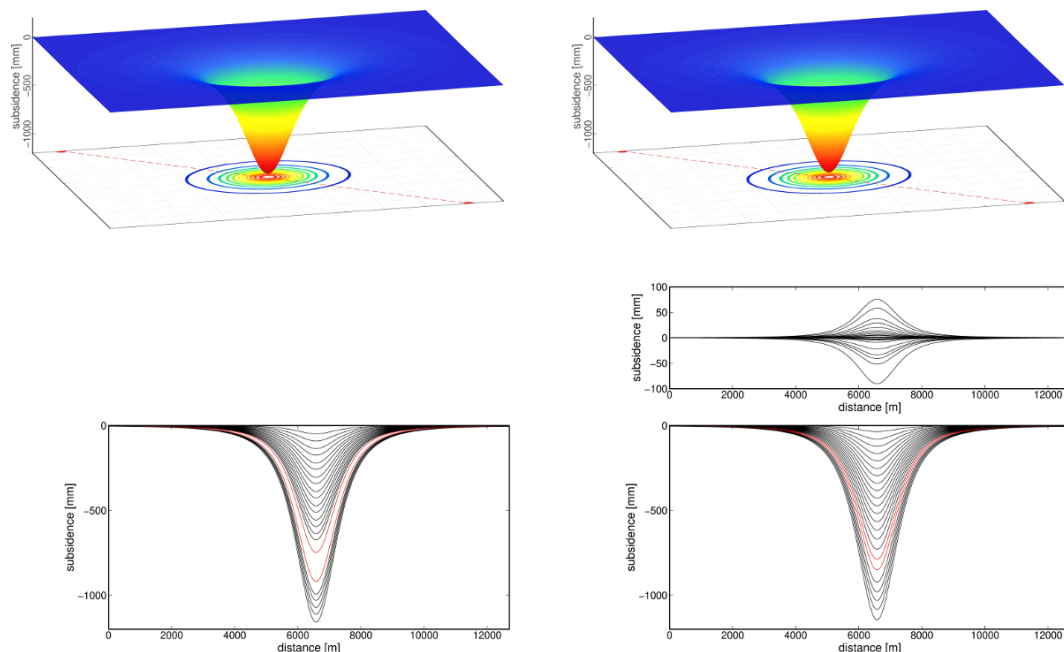


Rys. 28: Wyniki testowych obliczeń metodą SBAS dla 24 okresów. Symulacja osiadań oparta została na modelu Mogi. Na rysunku zaprezentowano niekłą osiadań dla pierwszego analizowanego przypadku w którym nie uwzględniono indukowanego wstrząsu sejsmicznego. Środkowy wykres przedstawia wartości składowych atmosferycznych. Wykres na dole przedstawia dynamikę przyrostów symulowanych osiadań powierzchni terenu. Przerwaną, czerwoną linią zaznaczono przebieg profilu (O1).

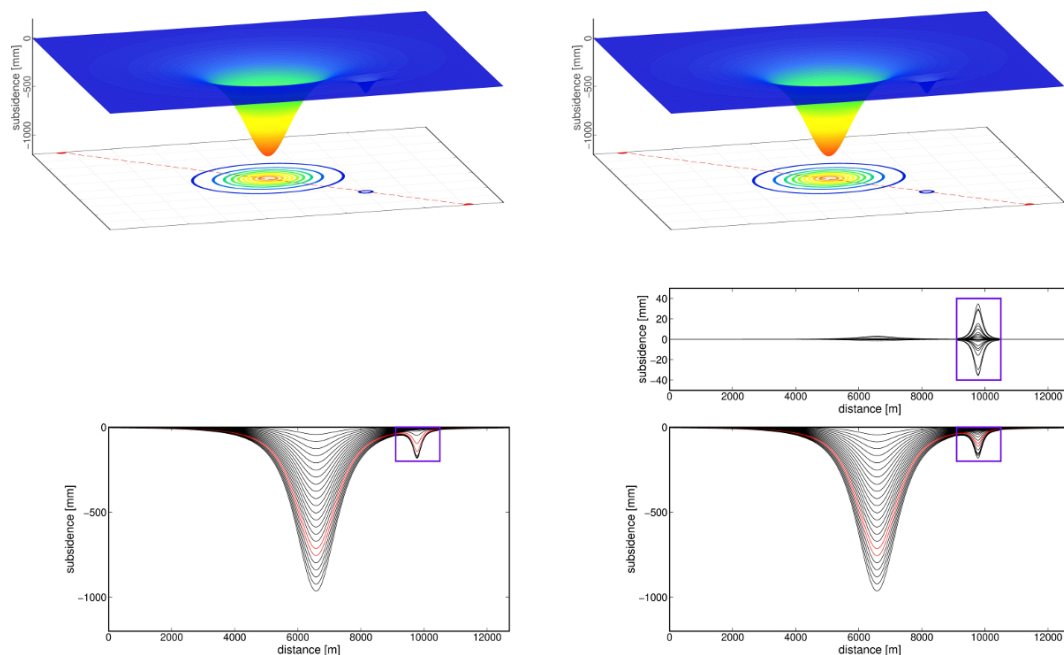
padku (rys. 29) założono wstrząs, który wystąpił w okresie pomiędzy  $t_{18}$  a  $t_{19}$ . W tym przypadku sumaryczne osiadania wyniosły -1150 mm. Na wykresie (rys. 29, prawa część, środek) obserwowane są wartości wyznaczonych poprawek atmosferycznych. Poprawki o maksymalnych wartościach od -90 do +75 mm zaobserwowano w okresach bezpośrednio przed i po wstrząsie ( $t_{18}$  i  $t_{19}$ ). Kolejnym spostrzeżeniem jest fakt, wystąpienia istotnych wartości poprawki atmosferycznej na wszystkich danych które tworzyły pary interferometryczne z okresem  $t_{18}$ . Jednocześnie wartość obniżenia pomiędzy okresami  $t_{18}$  a  $t_{19}$  wyniosła -61 mm. Trzeci przypadek zakładał również wystąpienie wstrząsu pomiędzy okresami  $t_{18}$  a  $t_{19}$ . Jednak o ile w poprzednim przypadku wstrząs zlokalizowany był dokładnie w niecce istniejących obniżień to w ostatnim scenariuszu wstrząs wystąpił poza obszarem wpływów eksploatacji na powierzchni (rys. 30).

Wykorzystana metoda jest metodą empiryczną z powodzeniem stosowana w obszarach charakteryzującymi się stałymi w czasie przemieszczeniami (Xu i in., 2017). Podobnie jak niektóre inne metody empiryczne (Bekaert i in., 2015), metoda ta nie jest odporna na nagłe zdarzenia (zdarzenie odstające). Do takich zdarzeń można zaliczyć wstrząsy górnicze. Przykład zastosowania metody dla obszaru gdzie oprócz stałych w czasie przemieszczeń występują sporadyczne nagłe zdarzenia przedstawiono na rysunku 31. Zaprezentowane wyniki dotyczą opisanych wcześniej modeli testowych. Stałe w czasie przemieszczenia powierzchni wyznaczone metodą SBAS z nieuwzględnieniem modelu są poprawne (tzn. stałe w czasie przyrosty obniżień). Odmierna sytuacja ma miejsce w przypadku wystąpienia zdarzenia, którego skutkiem są większe obserwowane na powierzchni przemieszczenia. W tym przypadku model redukuje wartości przemieszczeń do poziomu zbliżonego do tych z okresów w których powierzchnia przemieszczała się równomiernie. Wobec powyższego analizując przemieszczenia nie można jednoznacznie zidentyfikować miejsca wystąpienia wstrząsu. W takiej sytuacji wyniki nie są do końca wiarygodne. Dopiero analiza składowej atmosferycznej pozwala na uchwycenie momentu wstrząsu. Co ciekawe zestawiając wyniki skumulowanych przemieszczeń dla przypadków z wystawieniem wstrząsu i zastosowaniem modelu redukcji oraz bez modelu można stwierdzić iż końcowe wartości przemieszczeń są praktycznie takie same (rys. 31).

Otrzymane wyniki pokazały, że zastosowanie w obliczeniach SBAS modelu redukcji opóźnień atmosferycznych nie wpływa negatywnie, nie zaburza wyników przemieszczeń. Natomiast na podstawie przeprowadzonych obliczeń testowych wykazano, że w przypadku nagłego zdarzenia (np. o charakterze sejsmicznym) w składowej atmosferycznej fazie sygnału rejestrowany jest w pewnym sensie obraz samego zdarzenia (rys. 29, 30).

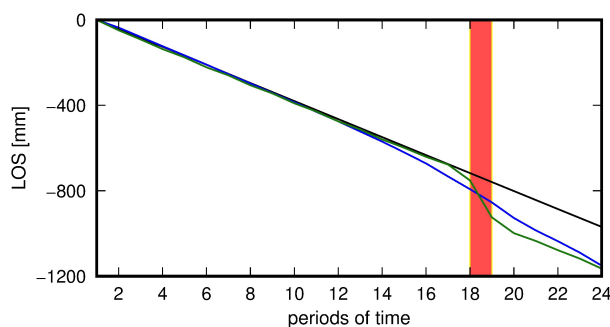


Rys. 29: Po prawej stronie zaprezentowano wyniki z wstrząsem górniczym, który wstąpił w okresie pomiędzy  $t_{18}$  a  $t_{19}$ , ale bez modelu redukcji składowej atmosferycznej. Po lewej stronie ten sam przypadek z jednoczesnym uwzględnieniem modelu. Środkowy wykres (po prawej stronie) przedstawia wartości składowych atmosferycznych. Natomiast wykresy na dole przedstawiają dynamikę przyrostów symulowanych osiadań powierzchni terenu. Przerywaną, czerwoną linią zaznaczono przebieg profilu (O1).



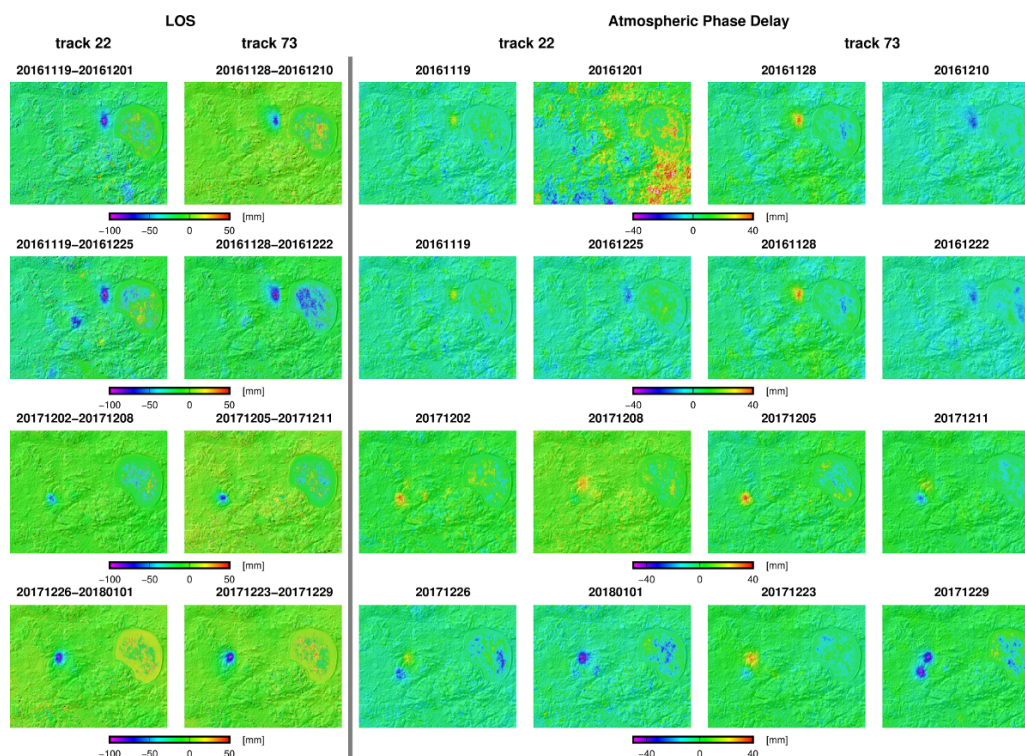
Rys. 30: Wyniki trzeciego, testowego przypadku w którym uwzględniono wstrząs górniczy zlokalizowany poza obszarem wpływu prowadzonej eksploatacji na powierzchnie terenu. Lewa część przedstawia wyniki bez uwzględnienia poprawki atmosferycznej, natomiast prawa część z jej uwzględnieniem. Przerywaną, czerwoną linią zaznaczono przebieg profilu, a lokalizację wstrząsu przedstawiono za pomocą fioletowego poligonu (O1).

Przeprowadzona przeze mnie analiza wyników (tab. 4, rys. 32) pokazała, że jest możliwość zaobserwowania obrazu wstrząsu w wyznaczonej składowej atmosferycznej. W przypadku obszaru LGOM zastosowany model redukcji opóźnień atmosferycznych pozwala w przeważającej większości przypadków na wykrycie indukowanych wstrząsów, których siła jest większa od  $M_w$  4.1.



Rys. 31: Wyniki obliczeni testowych - przemieszczenia punktu w centralnej części niecki obniżeniowej. Czarna linia reprezentuje przemieszczenia dla pierwszego przypadku, w którym nie uwzględniono wstrząsu górniczego i jednocześnie zastosowano model redukcji składowej atmosferycznej. Zielona linia dotyczy przypadku z wstrząsem górniczym jednakże bez wykorzystania modelu redukcji składowej atmosferycznej. Linia niebieska reprezentuje wyniki dla przypadku z wstrząsem górniczym oraz z zastosowaniem modelu redukcji składowej atmosferycznej. Obszar zaznaczony na czerwono dotyczy okresu w którym zasymulowano wstrząs (O1).

Wykazana własność obliczeń metodą SBAS z uwzględnieniem modelu empirycznej estymacji opóźnień atmosferycznych może być wykorzystana do wykrywania wpływów wstrząsów górniczych na powierzchnię. Analiza otrzymanych wyników pokazała, że detekcja wstrząsów w oparciu o dane SAR pozyskane w większym okresie niż 6-12 dni jest utrudniona z powodu obserwowanych w fazie sygnału wpływów eksploatacji górniczej. Na rysunku 32 przedstawiono wyniki dla trzech wybranych indukowanych zdarzeń sejsmicznych. Pierwsze dwa zestawienia dotyczą tego samego zdarzenia. Pierwszy wiersz przedstawia wyniki dla danych SAR z bazą czasową równą 12 dni. Otrzymane w tym przypadku wyniki pozwalają na jednoznacznie zlokalizowanie wstrząsu. W drugim wierszu przedstawiono wyniki przemieszczeń dla dłuższych baz czasowych, wynoszących odpowiedni: 36 dni (dla ścieżki 22) oraz 24 dni (dla ścieżki 73). W przypadku ścieżki 22 gdzie baza czasowa wynosiła ponad jeden miesiąc można zaobserwować dodatkowe niecki obniżeniowe, które są wynikiem wpływu eksploatacji na powierzchnię. Wiersze 3 i 4 prezentują wyniki dla wybranych wstrząsów wyznaczonych w oparciu o dane SAR z interwałem równym 6 dni. Obliczenia testowe uwzględniające model redukcji atmosferycznej wykazały dwie istotne, z punktu widzenia monitorowania powierzchni terenów górniczych cechy. Po pierwsze jeżeli w analizowanym obszarze występują stałe w czasie przemieszczenia to wtedy zastosowanie modelu nie wpływa istotnie na wielkość wyznaczonych przemieszczeń. Jeżeli natomiast na danym obszarze dojdzie do wstrząsu to wtedy zastawany model redukuje przemieszczenia będące skutkiem zdarzenia. Pewna ich wartość jest obserwowana na wyznaczonej poprawce atmosferycznej, a która to dotyczy zobrażeń tworzących pary interferometryczne. Jeżeli wstrząs wystąpił poza obszarem występowania wpływów eksploatacji to praktycznie cała wartość przemieszczeń jest redukowana. Obraz zdarzenia jest zarejestrowany w części sygnału odpowiadającego poprawce atmosferycznej. Z tego względu metoda nie powinna być stosowana do obszarów gdzie występują zmienne w czasie deformacje powierzchni terenu. Metoda ta może znaleźć zastosowanie na obszarach takich jak LGOM na których z racji prowadzonego systemu eksploatacji obserwowane są relatywnie stałe w czasie przemieszczenia. Jak pokazały wyniki metoda ta z powodzeniem pozwala na detekcję zmian wynikających występowania indukowanych zdarzeń sejsmicznych. Umożliwia wyznaczenie miejsca wstrząsu w przypadku kiedy daty akwizycji są większe od optymalnej wartości 6-12 dni (w przypadku Sentinel 1A/B).



Rys. 32: Zestawienie wyników przemieszczeń dla trzech wybranych wstrząsów górniczych. Po lewej stronie umieszczono wyniki przemieszczeń dla dwóch ścieżek. Po prawej stronie umieszczono wyniki składowych atmosferycznych odpowiednio przed i po wstrząsie (najbliższe możliwe daty) (O1).

Tab. 4: Wyniki obliczeń dla 23 wybranych wstrząsów górniczych, które wystąpiły na obszarze LGOM w latach 2014 – 2018 (O1).

date and time of event (UTC) (Day/Month/Year)	tremor [ $M_w$ ]	22		73		observed event			
		before ÷ after		before ÷ after		LOS		APS	
		(Day/Month/Year)		(Day/Month/Year)		22	73	22	73
05/05/2018-03:40:56 PM	4.0	01/05/2018 ÷ 07/05/2018		04/05/2018 ÷ 10/05/2018		-	-	-	-
14/04/2018-03:58:52 PM	4.1	13/04/2018 ÷ 19/04/2018		10/04/2018 ÷ 16/04/2018		-	-	-	-
26/12/2017-11:15:31 AM	4.5	26/12/2017 ÷ 01/01/2018		23/12/2017 ÷ 29/12/2017		+	+	+	+
07/12/2017-05:42:50 PM	4.1	02/12/2017 ÷ 08/12/2017		05/12/2017 ÷ 11/12/2017		+	+	+	+
10/11/2017-11:19:07 AM	4.3	08/11/2017 ÷ 14/11/2017		05/11/2017 ÷ 11/11/2017		+	+/-	+	+
27/10/2017-05:12:14 AM	4.0	27/10/2017 ÷ 02/11/2017		24/10/2017 ÷ 30/10/2017		+	+	+/-	+
31/05/2017-08:25:26 PM	4.5	30/05/2017 ÷ 11/06/2017		27/05/2017 ÷ 02/06/2017		-	-	-	-
08/04/2017-10:23:13 PM	4.3	31/03/2017 ÷ 12/04/2017		28/03/2017 ÷ 09/04/2017		+/-	+	+	+
17/03/2017-08:50:19 AM	4.2	07/03/2017 ÷ 19/03/2017		16/03/2017 ÷ 28/03/2017		+/-	+	+	+
04/03/2017-04:46:10 PM	4.1	23/02/2017 ÷ 07/03/2017		04/03/2017 ÷ 16/03/2017		-	-	-	-
16/12/2016-06:46:51 AM	4.6	13/12/2016 ÷ 25/12/2016		10/12/2016 ÷ 22/12/2016		+	+	+	+
29/11/2016-08:09:42 PM	4.5	19/11/2016 ÷ 01/12/2016		28/11/2016 ÷ 10/12/2016		+	+	+	+
17/10/2016-11:50:33 PM	4.3	14/10/2016 ÷ 26/10/2016		11/10/2016 ÷ 23/10/2016		+	+/-	+	+
14/09/2016-07:59:09 AM	4.1	14/09/2016 ÷ 26/09/2016		05/09/2016 ÷ 17/09/2016		-	-	-	-
13/08/2016-12:00:58 PM	4.3	09/08/2016 ÷ 21/08/2016		31/07/2016 ÷ 24/08/2016		-	-	-	-
02/06/2016-04:08:57 AM	4.0	29/05/2016 ÷ 10/06/2016		01/06/2016 ÷ 13/06/2016		-	-	-	-
11/05/2016-04:01:36 AM	4.0	23/04/2016 ÷ 17/05/2016		08/05/2016 ÷ 20/05/2016		-	-	-	-
09/09/2015-07:30:16 PM	4.0	08/09/2015 ÷ 20/09/2015		25/07/2015 ÷ 23/09/2015		-	-	-	-
19/07/2015-07:18:06 PM	4.2	10/07/2015 ÷ 22/07/2015		13/07/2015 ÷ 25/07/2015		-	-	-	-
08/07/2015-06:53:20 AM	4.4	28/06/2015 ÷ 10/07/2015		01/07/2015 ÷ 13/07/2015		-	-	-	-
05/02/2015-04:43:59 AM	4.0	04/02/2015 ÷ 16/02/2015		26/01/2015 ÷ 07/03/2015		+/-	+/-	+	+
28/01/2015-01:10:45 AM	4.3	23/01/2015 ÷ 04/02/2015		26/01/2015 ÷ 07/02/2015		-	-	-	-
12/12/2014-02:50:00 AM	4.1	06/12/2014 ÷ 18/12/2014		09/12/2014 ÷ 02/01/2015		+/-	+/-	+	+

\*S1A oznacza dane pozyskane z satelity Sentinel 1A, a S1B z satelity Sentinel 1B, znak + oznacza, że zaobserwowano wstrząs na interferogramie lub na składowej atmosferycznej. Znak - oznacza, że nie zaobserwowano wstrząsu. Znak +/- oznacza, że nie można było jednoznacznie wykazać wystąpienia wstrząsu lub jednoznacznie go wykluczyć.



## Podsumowanie

Klasyczne pomiary geodezyjne na terenach górniczych stanowią podstawowe źródło danych, na podstawie których możliwe jest określanie wpływów eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu. Przemieszczenia powierzchni na terenach górniczych niezmienione stanowią jeden z głównych negatywnych wpływów ingerencji człowieka w górotwór. Aktualny stan wiedzy dotyczący satelitarnej interferometrii radarowej, a także dostępne dane oraz metody obliczeniowe pozwalają na wykorzystanie jej jako dodatkowego i niezależnego źródła informacji w zakresie wyznaczania przemieszczeń powierzchni. Uważam, że przedstawione w niniejszym autoreferacie osiągnięcie naukowe stanowi istotny wkład w badaniach nad możliwością stosowania satelitarnych danych radarowych w określaniu wpływów eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu.

Uważam również, że zrealizowałem postawiony sobie cel jednotematycznego cyklu publikacji. Najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych prac badawczych przedstawionych w publikacjach (**O1-O8**) zestawilem poniżej. Wnioski pogrupowałem względem celów szczegółowych przedstawionych na początku autoreferatu.

*W obszarze wykazania możliwości zastosowania metod typu time series InSAR (PSInSAR oraz SBAS) w celu badania długookresowych przemieszczeń powierzchni na terenach pogórnich oraz górniczych.*

- Wykazałem możliwość prowadzenia długookresowych (15 lat), historycznych analiz przemieszczeń na terenach górniczych i pogórnich w oparciu metodę PSInSAR oraz dane pochodzące z satelitów ERS1/2 i Envisat.
- Wykazałem możliwość wspólnej analizy danych SAR pochodzących z różnych satelitów.
- Wykazałem w oparciu o archiwalne dane SAR, na bezpośrednią korelację pomiędzy podnoszeniem się poziomów wodonośnych, a wypiętrzaniem powierzchni terenu pogórnich w rejonie Wałbrzycha. Jednocześnie wykazałem, że w przypadku terenów pogórnich w Wałbrzychu wpływ odbudowy poziomów wodonośnych oddziaływał bezpośrednio nad danym zbiornikiem.
- Uzyskane przeze mnie wyniki obliczeń pozwoliły na prześledzenie w czasie zmian jakie zachodziły na pogórnym obszarze WKWK. Precyzyjnie wyznaczyłem rejony na których w okresie poeksploatacyjnym obserwowano zarówno obniżenia jak i wypiętrzenia terenu.
- Na podstawie analizy charakterystycznych punktów zlokalizowanych w obszarze wszystkich zbiorników wodnych wykazałem, że po okresie wypiętrzenia powierzchni terenu następuje krótki okres stagnacji. Okres wypiętrzenia jest bezpośrednio związany z odbudową poziomów wodonośnych. Po okresie stagnacji następuje pewnego rodzaju korekta przemieszczeń. Korekta przejawia się ponownym obniżaniem powierzchni terenu po którym następuje ostateczne ustabilizowanie.
- W odniesieniu do publikacji (**O7**) wykazałem, że satelitarna interferometria radarowa może być stosowana do wykrywania przemieszczeń na obszarze kopalni odkrywkowej. Wykazałem również (w pewnej liczbie przypadków), że bez uwzględnienia w obliczeniach poprawek wynikających z przejścia sygnału przez jonosferę i troposferę metody InSAR mogą co najwyżej stanowić uzupełniające źródło informacji w tym zakresie.
- Wykazałem, że na podstawie dużego zbioru danych SAR oraz w oparciu o metodę SBAS możliwe jest śledzenie dynamiki wpływu podziemnej eksploatacji rud miedzi na powierzchnię (**O1**).

Dodatkowo publikacja (**O6**) jest pierwszą pozycją w kraju, która dotyczy analizy przemieszczeń w okresie poeksploatacyjnym na podstawie danych SAR w odniesieniu do całego nieczynnego zagłębia węgla kamiennego. Z kolei publikacja (**O7**) jest pierwszym tego typu opracowaniem w Polsce oraz jedną z pierwszych na świecie pozycji, w której do oceny aktywności powierzchni terenu kopalni odkrywkowej wykorzystano dane SAR pochodzące z satelity Sentinel 1A/B oraz metodę SBAS.

*W obszarze opracowania sposobu jednoczesnej estymacji wpływu opóźnień: troposferycznego i jonosferycznego w obliczeniach danych SAR.*

- Opracowałem metodę jednoczesnej estymacji opóźnień atmosferycznych w obliczeniach metodą DInSAR, którą z powodzeniem zastosowałem m.in. na obszarze podziemnej eksploatacji rud miedzi. Metoda opiera się na wykorzystaniu następujących modeli:
  - Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR (GACOS) - dla wyznaczenia opóźnienia troposferycznego,
  - Split-Spectrum - dla wyznaczenia opóźnienia jonosferycznego,
- Wykazałem, że zaproponowana przeze mnie implementacja sposobu estymacji opóźnień atmosferycznych nie wpływa negatywnie na wartości maksymalne przemieszczeń powierzchni.
- Na podstawie przeprowadzonych obliczeń dla obszaru LGOM (wstrząsy górnicze) oraz Chile (naturalne trzęsienia ziemi) stwierdziłem, że zastosowanie opracowanej przeze mnie metody znacząco niweluje lokalne wahania przemieszczeń, a także istotnie globalnie poprawia wyniki.

*W obszarze wykazania możliwości zastosowania metod InSAR w detekcji indukowanych zdarzeń sejsmicznych na terenach górniczych.*

- Wykazałem możliwość zastosowania danych z satelitów Sentinel 1A/B do detekcji zmian powierzchni wywołanych wstrząsami górniczymi.
- Dla dokładniejszej analizy wpływu wstrząsu górniczego na powierzchnię zaproponowałem obliczenia dwiema niezależnymi metodami: DInSAR oraz SBAS.
- Przeprowadziłem serię obliczeń testowych opartych na modelu Mogi, który pierwotnie jest wykorzystywany do badań deformacji powierzchni wokół wulkanów. Celem obliczeń testowych było zbadanie wpływu uwzględnienia w obliczeniach danych SAR metodą SBAS empirycznego modelu redukcji wpływu atmosfery (Tymofeyeva i Fialko, 2015).
- Wykazałem, że uwzględnienie w obliczeniach modelu empirycznej estymacji opóźnień atmosferycznych (Tymofeyeva i Fialko, 2015) pozwala wykryć wpływ wstrząsu na powierzchni. Wpływ takiego wstrząsu na powierzchnię jest rejestrowany w fazie sygnału będącego składową opóźnienia atmosferycznego.
- Na podstawie analizy 23 wstrząsów górniczych z obszaru LGOM (lata 2014-2018) wykazałem, że detekcja wstrząsów w oparciu o dane SAR pozyskane w większym okresie niż 6-12 dni jest utrudniona z powodu obserwowanych w fazie sygnału wpływów eksploatacji górniczej. Ponadto wykazałem, że w takich przypadkach zastosowanie modelu (Tymofeyeva i Fialko, 2015) pozwala na dokładne odseparowanie w fazie interferogramu składowej wynikającej z wystąpienia samego wstrząsu od przemieszczeń będących skutkiem prowadzonej eksploatacji.

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

Moja pozostała działalność naukowa, poza powyżej wskazanym osiągnięciem naukowym skupiała się głównie wokół przedstawionych poniżej obszarów badawczych.

### **Pomiary przemieszczeń powierzchni na terenach pogórnich z wykorzystaniem klasycznych metod pomiarowych oraz ocena wpływu zakończonej eksploatacji na powierzchnie terenu**

W okresie studiów doktoranckich prowadziłem pomiary geodezyjne na obszarze pogórnym Wałbrzycha. W ramach uzyskanego grantu promotorskiego nr N524 465436 (*Analiza zmian powierzchni górotworu po zakończonej eksploatacji górniczej w wybranym rejonie dawnego Wałbrzyskiego Zagłębia*) zaprojektowałem sieć pomiarową, a następnie przeprowadziłem na niej pomiary niwelacyjne oraz pomiary GNSS. Celem przeprowadzonych prac w ramach projektu badawczego była ocena stanu geometrycznego powierzchni górotworu w wybranym fragmencie dawnego Wałbrzyskiego Zagłębia Węgla Kamiennego w okresie eksploatacji oraz po zakończeniu wydobywania.

W latach 2014 - 2017 kierowałem projektem badawczym finansowanym przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Projekt był realizowany przez Politechnikę Wrocławską w formie zleconych przez miasto Wałbrzych badań. Celem przedsięwzięcia *Określenie stanu aktywności powierzchni terenu na obszarze poeksploatacyjnym byłych kopalń wałbrzyskich* było m.in.: rozpoznanie, projekt i zagęszczenie osnowy pomiarowej oraz wykonanie 4 kampanii pomiarowych. W ramach pierwszego etapu wykonałem inwentaryzację istniejących punktów wysokościowych na obszarze Wałbrzycha i okolic. Na tej podstawie opracowałem projekt sieci niwelacyjnej składającej się z punktów osnowy II i III klasy, a także punktów z sieci kopalnianych. Łączna liczba punktów pomiarowych w sieci wyniosła 487, a długość wszystkich odcinków niwelacyjnych 86 km. Dodatkowo w rejonach gdzie istniejąca sieć punktów była niewystarczająca zastabilizowałem dodatkowe repery - łącznie 24. Na tak przygotowanej sieci wykonano cztery kampanie pomiarowe (niwelacja precyzyjna) w okresie od listopada 2014 do maja 2016 roku.

Spośród 487 analizowanych reperów na 78 zaobserwowałem istotne przemieszczenia. Rejon dzielnicy Nowe Miasto obniżył się w analizowanym czasie o około -6.5 mm. Maksymalne pionowe przemieszczenia (w okresie od listopada 2014 do listopada 2015 roku) zaobserwowałem na reperach: 1077 oraz 1076 (rejon ulicy Głowackiego) i wyniosły one ponad -10.5 mm. Największa liczba "aktywnych" reperów zlokalizowana była w rejonie Nowego Miasta, a także wzdłuż ulicy 11-Listopada. Ponadto zaobserwowałem przemieszczenia w rejonach ulic: 1-Maja oraz Piasta.

Przeprowadziłem również analizy zmian powierzchni terenu w rejonie nieczynnego zakładu górniczego "Konrad" w Iwinach (Głowacki i Milczarek, 2013).

Efektom przeprowadzonych przeze mnie prac badawczych w tym zakresie były następujące publikacje oraz raporty:

- Blachowski J., **Milczarek W.**, Analysis of surface changes in the Wałbrzych hard coal mining grounds (SW Poland) between 1886 and 2009. Geological Quarterly. 2014, vol. 58, nr 2, s. 353-367  
**IF = 1.000, pkt MNiSzW 20**
- Blachowski J., **Milczarek W.**, Stefaniak P., Deformation information system for facilitating studies of mining-ground deformations, development, and applications. Natural Hazards and Earth System Sciences. 2014, vol. 14, nr 7, s. 1677-1689  
**IF = 1.735, pkt MNiSzW 30**
- Blachowski J., **Milczarek W.**, Deformacje wtórne terenów górniczych na obszarze dawnego Zagłębia Wałbrzyskiego. Miernictwo górnicze i ochrona terenów górniczych w obecnych warunkach wydobywania surowców mineralnych w Polsce, Wydawnictwa AGH, Kraków, 2016 113-123.
- **Milczarek W.**, Blachowski J., Wałbrzyskie Zagłębie Węglowe – aktualny stan wiedzy na temat pogórnich deformacji powierzchni terenu. (red. Przylibski T.) Mat. III Polskiego Kongresu Górniczego 2015, Wrocław, s. 486-488.

- Cacoń S., Blachowski J., **Milczarek W.**, Problem układu odniesienia dla sieci geodezyjnej w monitorowaniu deformacji terenów górniczych. *Przegląd Górniczy*, 2013, 8, 14-19.
- Głowacki T., **Milczarek W.**, Surface deformation of the secondary former mining areas. W: 11. Altbergbau-Kolloquium und 7. Konferenz Erbe und Geschichte des Bergbaus, 700 Jahre Kupfererzbergbau in Niederschlesien, 03. bis 05. November 2011, Wrocław / [Hrsg. G. Meier i in.]. Essen, VGE Verlag GmbH, cop. 2011. s. 182-197.

### Naziemny skaniny laserowy w pomiarach odkształceń obiektów inżynieryjnych, a także w zakresie dokumentowania starych wyrobisk

W pierwszych latach po uzyskaniu stopnia doktora prowadziłem prace badawcze związane z wykorzystaniem naziemnego skaniny laserowanego w pomiarach odkształceń obiektów inżynieryjnych (chłodnie kominowe, kominy), inwentaryzacji starych wyrobisk górniczych oraz inwentaryzacji architektonicznej. Efektem przeprowadzonych przeze mnie prac badawczych w tym zakresie były następujące publikacje oraz raporty:

- Kądzioła K., Kasza D., **Milczarek W.**, Three-dimensional model of the Rzezka object (the Riese Complex, Sowie Range) as an enhancement of the comprehensive geotourism potential of an underground tourist route, XXIIIrd Autumn School of Geodesy, Wałbrzych, Poland, September 21-22, 2017 / Jan B. Blachowski, J. Górniak-Zimroz and D. Kasza (Eds.), EDP Sciences, 2018. art. 00015, s. 1-8., (E3S Web of Conferences, ISSN 2267-1242; vol. 55).
- Muszyński Z., **Milczarek W.**, Application of terrestrial laser scanning to study the geometry of slender objects, World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium: 11-15 September 2017, Prague, Czech Republic, IOP Publishing, 2017. art. 042069, s. 1-7. (IOP Conference Series - Earth and Environmental Science, ISSN 1755-1315; vol. 95).
- Wajs J., **Milczarek W.**, Głowacki T., Pomiar geometrii hiperboloidalnych chłodni kominowych metodą naziemnego skaniny laserowego. *Zagadnienia interdyscyplinarne w górnictwie i geologii: XVI Konferencja Doktorantów i Młodych Uczonych, Szklarska Poręba, 17-20 maja 2016.*
- Kasza D., **Milczarek W.**, Wajs J., Modelowanie 3D obiektów podziemnych z chmury punktów na przykładzie Jaskini Niedźwiedziej w Kletnie. *Zagadnienia interdyscyplinarne w górnictwie i geologii: XVI Konferencja Doktorantów i Młodych Uczonych, Szklarska Poręba, 17-20 maja 2016.*
- Kasza D., **Milczarek W.**, Modelowanie obiektów podziemnych oraz struktur geologiczno-tektonicznych z chmury punktów, XV Konferencja Doktorantów i Młodych Uczonych, Szklarska Poręba, 20-22 maja 2015.
- Muszyński Z., **Milczarek W.**, Modelowanie przemieszczeń pionowych na podstawie danych z naziemnego skanera laserowego. *Geoinformacja jako metoda ochrony przed zagrożeniami / pod red. Krzysztofa Karszni i Konrada Podawcy. Warszawa, Wydawnictwo SGGW, 2014. s. 42-63.*
- Muszyński Z., Głowacki T., **Milczarek W.**, Wajs J., Słoniński T., Grygiel A., Geodezja pomiaru przemieszczeń i odkształceń chłodni kominowej W-2/2 w Elektrowni Bełchatów wraz z opracowaniem wyników. *Raporty Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej. 2016, Ser. SPR nr 14, 111 s.*
- Muszyński Z., Głowacki T., **Milczarek W.**, Wajs J., Słoniński T., Grygiel A., Badania specjalistyczne stanu geometrycznego chłodni hiperboloidalnych huty miedzi Głogów I i II. *Raporty Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej. 2015, Ser. SPR nr 20, 48 s.*
- Głowacki T., Dudek A., Muszyński Z., **Milczarek W.**, Wajs J., Kasza D., Grygiel A., Badania specjalistyczne stanu geometrycznego chłodni hiperboloidalnych huty miedzi Głogów I i II. *Raporty Inst. Gór. PWroc. 2014, Ser. SPR nr 3, 92 s.*
- Głowacki T., Dudek A., Muszyński Z., **Milczarek W.**, Wajs J., Grygiel A., Badania specjalistyczne stanu geometrycznego chłodni hiperboloidalnych huty miedzi Głogów I i II. *Raporty*

Inst. Gór. PWroc. 2014, Ser. SPR nr 24, 60 s.

- Głowacki T., **Milczarek W.**, Dudek A., Śliwonik W., Grygiel A., Operat geodezyjny : aktualizacja oraz poszerzenie obszaru objętego mapami dla wybranych terenów pogórniczych "Kopalni Św. Jana" w Krobicy. Raporty Inst. Gór. PWroc. 2011, Ser. SPR nr 10, 7 s.

Jako opiekun koła naukowego Grupa Młodych Geodetów zainicjowałem prace związane z wykorzystaniem naziemnego skaningu laserowego do określenia zagrożenia lawinowego w wybranych obszarach Sudetów. Efektem tych prac były pomiary (skaningu laserowego) wybranych rejonów Sudetów (Biały Jar, Kocioł Łomniczki, Kocioł Małego Stawu i Kocioł Wielkiego Stawu).

Efektom prowadzonych prac były również prowadzone przeze mnie prace dyplomowe:

- *Opracowanie pomiarów chłodni kominowej wykonanych techniką naziemnego skaningu laserowego*, praca inżynierska (praca wyróżniona), Diana Piróg, 2014,
- *Pomiary wychylenia masztu telekomunikacyjnego metodą tachimetryczną oraz skaningu laserowego*, praca inżynierska, Michał Najdek, 2014,
- *Ocena dokładności pomiaru techniką naziemnego skaningu laserowego w zależności od skanowanej powierzchni*, praca inżynierska, Karolina Karwowska, 2014,
- *Opracowanie przestrzennego modelu Auli Leopoldina z wykorzystaniem skaningu laserowego*, praca magisterska (praca wyróżniona), Barbara Kubiak, 2016.

### Wykorzystanie Systemów Informacji Geograficznych w analizach wpływu eksploatacji górniczej na powierzchnie

Część mojej aktywności naukowej związana jest z szeroko rozumianymi systemami informacji geograficznej (GIS). Poczynając od studiów doktoranckich, aż do dnia dzisiejszego wykorzystuję narzędzia GIS do gromadzenia, przetwarzania i analizowania otrzymywanych wyników. W okresie studiów doktoranckich, a także w pierwszych latach po uzyskaniu stopnia doktora wykorzystywałem narzędzia GIS do gromadzenia danych przestrzennych dotyczących: prowadzonej eksploatacji górniczej na obszarze Wałbrzycha, danych geologicznych, a także danych mierniczych. Bazując na danych geologicznych pozyskanych z Państwowego Instytutu Geologicznego opracowałem przestrzenny model geologicznych, który posłużył mi do opracowania modeli geometrycznych wykorzystywanych później w obliczeniach numerycznych. Obecnie, narzędzia GIS są przeze mnie wykorzystywane w analizie wyników obliczeń danych radarowych - szczególnie tych pozyskanych z metod PSInSAR oraz SBAS. Efektem przeprowadzonych przeze mnie prac badawczych w tym zakresie były następujące publikacje oraz raporty:

- Blachowski J., Górniak-Zimroz J., **Milczarek W.**, Pactwa K., Applications of geomatics in surface mining, World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium: 11-15 September 2017, Prague, Czech Republic, IOP Publishing, 2017. art. 042009, s. 1-9, (IOP Conference Series - Earth and Environmental Science, ISSN 1755-1315; vol. 95).
- **Milczarek W.**, Określenie aktywności powierzchni górotworu po zakończonej eksploatacji na obszarze byłych kopalń wałbrzyskich. Raporty Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej. 2017, Ser. SPR nr 2, 580 s.
- Blachowski J., Grzempowski P., **Milczarek W.**, Nowacka A., Opracowanie metody numerycznego modelowania deformacji terenu górniczego w złożonych geologiczno-górnicznych warunkach eksploatacji. Raporty Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej. 2016, Ser. SPR nr 7, 15, [2] s.
- Blachowski J., **Milczarek W.**, Woźniak J., Opracowanie punktowej mapy geologiczno-inżynierskiej w ramach realizacji zadań z zakresu wspomagania systemów gromadzenia i przetwarzania danych związanych z dostępem do informacji o środowisku dla Wydziału Ochrony Środowiska i Rolnictwa Urzędu Miasta Opole. Raporty Inst. Gór. PWroc. 2011, Ser. SPR nr 45, 12 s.
- Blachowski J., **Milczarek W.**, 2011, Development and application of 3D geological model and geoinformation system for numerical modelling of ground deformations in abandoned

underground coal mines. W: Mathematical geosciences at the crossroads of theory and practice, Proceedings of the IAMG 2011 Conference, September 5-9, 2011, Salzburg, Austria, (Red) Robert Marschallinger, Fritz Zobl, ÖAW. Austrian Academy of Sciences. s. 837-851.

### Wykorzystanie modelowania numerycznego (metody elementów skończonych) do oceny wpływu podziemnej eksploatacji górniczej na powierzchnię

W pierwszych latach po uzyskaniu stopnia doktora kontynuowałem prace badawcze związane z wykorzystaniem metody elementów skończonych do oceny wpływu podziemnej eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu na obszarach pogórnich. W 2012 roku odbyłem trzymiesięczny staż naukowy na University of New Brunswick (Kanada), w czasie którego realizowałem badania rozpoczęte w trakcie studiów doktoranckich - wykorzystanie modelowania numerycznego do oceny wpływu podziemnej eksploatacji górniczej na powierzchnię. Efektem przeprowadzonych przeze mnie prac badawczych w tym zakresie była publikacja:

- Chrzanowska A., **Milczarek W.**, Bazanowski M., Wyznaczanie rozkładu naprężeń i deformacji w naruszonym górotworze. Ochrona obiektów na terenach górniczych : praca zbiorowa / pod red. Andrzeja Kowalskiego. Katowice: GIG, 2012. s. 254-264.

Podpis wnioskodawcy

## Literatura

- Antonello G., Casagli N., Farina P., Leva D., Nico G., Sieber A.J., Tarchi D. Ground-based SAR interferometry for monitoring mass movements. *Landslides*, 1(1):21–28, 2004. ISSN 1612-5118. doi:10.1007/s10346-003-0009-6.
- Barnhart W.D., Benz H.M., Hayes G.P., Rubinstein J.L., Bergman E., Benz H.M., Hayes G.P., Rubinstein J.L., Bergman E. Journal of Geophysical Research : Solid Earth. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, (Figure 1):1–11, 2014. doi:10.1002/2014JB011227.Received.
- Bekaert D.P.S., Walters R.J., Wright T.J., Hooper A.J., Parker D.J. Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. *Remote Sensing of Environment*, 170:40–47, 2015. ISSN 0034-4257. doi:10.1016/j.rse.2015.08.035.
- Bischoff M., Cete A., Fritschen R., Meier T. Coal mining induced seismicity in the Ruhr area, Germany. *Pure and Applied Geophysics*, 167(1-2):63–75, 2010. ISSN 00334553. doi:10.1007/s00024-009-0001-8.
- Blachowski J., Kopeć A., Milczarek W., Owczarż K. Evolution of secondary deformations captured by satellite radar interferometry: Case study of an abandoned coal basin in sw poland. *Sustainability*, 11(3), 2019. ISSN 2071-1050.
- Bric R., Parizzi A., Eineder M., Bamler R., Meyer F. Estimation and compensation of ionospheric delay for SAR interferometry. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, (3):2908–2911, 2010. ISSN 2153-6996. doi:10.1109/IGARSS.2010.5652231.
- Bürgmann R., Rosen P.A., Fielding E.J. Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1):169–209, 2000. doi:10.1146/annurev.earth.28.1.169.
- Carlà T., Farina P., Intrieri E., Ketizmen H., Casagli N. Integration of ground-based radar and satellite InSAR data for the analysis of an unexpected slope failure in an open-pit mine. *Engineering Geology*, 235(December 2017):39–52, 2018. ISSN 00137952. doi:10.1016/j.enggeo.2018.01.021.
- Chaussard E., Bürgmann R., Shirzaei M., Fielding E.J., Baker B. Journal of Geophysical Research : Solid Earth. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 1–19, 2014. ISSN 21699313. doi:10.1002/2014JB011266.Received.
- Cuenca C.M., Hooper A.J., Hanssen R.F. Surface deformation induced by water influx in the abandoned coal mines in Limburg, The Netherlands observed by satellite radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 88:1–11, 2013. ISSN 09269851. doi:10.1016/j.jappgeo.2012.10.003.

- Doin M.P., Lasserre C., Peltzer G., Cavalié O., Doubre C. Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: Validation with global atmospheric models. *Journal of Applied Geophysics*, 69(1):35–50, 2009. ISSN 0926-9851. doi:10.1016/j.jappgeo.2009.03.010.
- Doležalová H., Kajzar V., Souček K., Staš L. Evaluation of mining subsidence using GPS data. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 6(3):359–367, 2009. ISSN 12149705.
- Drzewiecki J., Piernikarczyk A. The forecast of mining-induced seismicity and the consequent risk of damage to the excavation in the area of seismic event. *Journal of Sustainable Mining*, 16(1):1–7, 2017. ISSN 23003960. doi:10.1016/j.jsm.2017.05.001.
- Duque S., Lopez-Sanchez J., Mallorqui J., Herrera G., Tomás R., Mulas J., Delgado J. Advanced DInSAR analysis on mining areas: La Union case study (Murcia, SE Spain). *Engineering Geology*, 90(3-4):148–159, 2007. ISSN 00137952. doi:10.1016/j.enggeo.2007.01.001.
- Fattahi H., Simons M., Agram P. InSAR Time-Series Estimation of the Ionospheric Phase Delay: An Extension of the Split Range-Spectrum Technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(10):5984–5996, 2017. ISSN 01962892. doi:10.1109/TGRS.2017.2718566.
- Gee D., Bateson L., Sowter A., Grebby S., Novellino A., Cigna F., Marsh S., Banton C., Wyatt L. Ground Motion in Areas of Abandoned Mining: Application of the Intermittent SBAS (ISBAS) to the Northumberland and Durham Coalfield, UK. *Geosciences*, 7(3):85, 2017. ISSN 2076-3263. doi:10.3390/geosciences7030085.
- Gibowicz S., Kijko A. *An Introduction to Mining Seismology*. Academic Press, 1994.
- Gomba G., Parizzi A., Zan F.D., Eineder M., Member S., Bamler R. New\_electric\_propulsion.pdf. 54(3):1446–1461, 2016. ISSN 0196-2892. doi:10.1109/TGRS.2015.2481079.
- González P.J., Bagnardi M., Hooper A.J., Larsen Y., Marinkovic P., Samsonov S.V., Wright T.J. The 2014-2015 eruption of Fogo volcano: Geodetic modeling of Sentinel-1 TOPS interferometry. *Geophysical Research Letters*, 42(21):9239–9246, 2015. ISSN 19448007. doi:10.1002/2015GL066003.
- Głowacki T., Milczarek W. Surface deformation of the secondary former mining areas. *Mining Science*, 20:39–55, 2013. ISSN 2300-9586. doi:10.5277/gig132004.
- Henderson S.T., Pritchard M.E. Decadal volcanic deformation in the central andes volcanic zone revealed by InSAR time series. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(5):1358–1374, 2013. ISSN 15252027. doi:10.1002/ggge.20074.
- Hussain E., Hooper A., Wright T.J., Walters R.J., Bekaert D.P. Interseismic strain accumulation across the central North Anatolian Fault from iteratively unwrapped InSAR measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(12):9000–9019, 2016. ISSN 21699356. doi:10.1002/2016JB013108.
- Jung H.C., Kim S.W., Jung H.S., Min K.D., Won J.S. Satellite observation of coal mining subsidence by persistent scatterer analysis. *Engineering Geology*, 92(1):1–13, 2007. ISSN 0013-7952. doi:https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.02.007.
- Kubacki T., D. K.K., L. P.K., K. M.M. Changes in mining-induced seismicity before and after the 2007 Crandall Canyon Mine collapse. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(6):4876–4889, 2014. doi:10.1002/2014JB011037.
- Kusznir N.J., Ashwin D.P., Bradley A.G. Mining induced seismicity in the North Staffordshire coalfield, England. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 17(1):45–55, 1980. ISSN 0148-9062. doi:https://doi.org/10.1016/0148-9062(80)90005-4.
- Li Z., Fielding E.J., Cross P., Preusker R. Advanced InSAR atmospheric correction: MERIS/MODIS combination and stacked water vapour models. *International Journal of Remote Sensing*, 30(13):3343–3363, 2009. ISSN 0143-1161. doi:10.1080/01431160802562172.
- Liu D., Shao Y., Liu Z., Riedel B., Sowter A., Niemeier W., Bian Z. Evaluation of InSAR and TomoSAR for Monitoring Deformations Caused by Mining in a Mountainous Area with High Resolution Satellite-Based SAR. *Remote Sensing*, 6(2):1476–1495, 2014. ISSN 2072-4292. doi:10.3390/rs6021476.
- Ma C., Cheng X., Yang Y., Zhang X., Guo Z., Zou Y. Investigation on Mining Subsidence Based on Multi-Temporal InSAR and Time-Series Analysis of the Small Baseline Subset—Case Study of Working Faces 22201-1/2 in Bu’ertai Mine, Shendong Coalfield, China. *Remote Sensing*, 8(11), 2016. ISSN 2072-4292. doi:10.3390/rs8110951.

- Malinowska A.A., Witkowski W.T., Guzy A., Hejmanowski R. Mapping ground movements caused by mining-induced earthquakes applying satellite radar interferometry. *Engineering Geology*, 246(August):402–411, 2018. ISSN 00137952. doi:10.1016/j.enggeo.2018.10.013.
- Milczarek W. Investigation of post induced seismic deformation of the 2016 mw 4.2 tarnovek poland mining tremor based on dinsar and sbas method. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 194(2):402–411, 2019. ISSN 1214-9705.
- Paradella W.R., Ferretti A., Mura J.C., Colombo D., Gama F.F., Tamburini A., Santos A.R., Novali F., Galo M., Camargo P.O., Silva A.Q., Silva G.G., Silva A., Gomes L.L. Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis. *Engineering Geology*, 193:61–78, 2015. ISSN 0013-7952. doi:https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.04.015.
- Peduto D., Nicodemo G., Maccabiani J., Ferlisi S. Multi-scale analysis of settlement-induced building damage using damage surveys and DInSAR data: A case study in The Netherlands. *Engineering Geology*, 218:117–133, 2017. ISSN 00137952. doi:10.1016/j.enggeo.2016.12.018.
- Remy D., Chen Y., Froger J.L., Bonvalot S., Cordoba L., Fustos J. Revised interpretation of recent InSAR signals observed at Llaima volcano (Chile). *Geophysical Research Letters*, 42(10):3870–3879, 2015. ISSN 19448007. doi:10.1002/2015GL063872.
- Riemer K., Durrheim R. Mining seismicity in the Witwatersrand Basin: monitoring, mechanisms and mitigation strategies in perspective. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 4(3):228–249, 2012. ISSN 16747755. doi:10.3724/SP.J.1235.2012.00228.
- Rosen P.A., Hensley S., Chen C. Measurement and mitigation of the ionosphere in L-band Interferometric SAR data. *IEEE National Radar Conference - Proceedings*, 1459–1463, 2010. ISSN 10975659. doi:10.1109/RADAR.2010.5494385.
- Samsonov S., Smets B., D'Oreye N., Smets B. Ground deformation associated with post-mining activity at the French – German border revealed by novel InSAR time series method. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 23:142–154, 2013. ISSN 0303-2434. doi:10.1016/j.jag.2012.12.008.
- Tong X., Sandwell D.T., Smith-Konter B. High-resolution interseismic velocity data along the San Andreas Fault from GPS and InSAR. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(1):369–389, 2013. ISSN 21699356. doi:10.1029/2012JB009442.
- Tung S., Masterlark T. Coseismic slip distribution of the 2015 Mw7.8 Gorkha, Nepal, earthquake from joint inversion of GPS and InSAR data for slip within a 3-D heterogeneous Domain. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(5):3479–3503, 2016. ISSN 21699356. doi:10.1002/2015JB012497.
- Tymofyeyeva E., Fialko Y. Mitigation of atmospheric phase delays in InSAR data, with application to the eastern California shear zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(8):5952–5963, 2015. ISSN 21699356. doi:10.1002/2015JB011886.
- Wang W., Meng X., Peng Z., Chen Q.f., Liu N. Increasing background seismicity and dynamic triggering behaviors with nearby mining activities around Fangshan Pluton in Beijing, China. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 5624–5638, 2015. doi:10.1002/2015JB012235.Received.
- Xu X., Sandwell D.T., Tymofyeyeva E., González-Ortega A., Tong X. Tectonic and Anthropogenic Deformation at the Cerro Prieto Geothermal Step-Over Revealed by Sentinel-1A InSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(9):5284–5292, 2017. ISSN 0196-2892. doi:10.1109/TGRS.2017.2704593.
- Yu C., Li Z., Penna N.T., Crippa P. Generic Atmospheric Correction Model for Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 9202–9222, 2018. ISSN 21699356. doi:10.1029/2017JB015305.
- Yu C., Penna N.T., Li Z. Generation of real-time mode high-resolution water vapor fields from GPS observations. *Journal of Geophysical Research*, 122(3):2008–2025, 2017. ISSN 21562202. doi:10.1002/2016JD025753.
- Zhao C., Lu Z., Zhang Q. Time-series deformation monitoring over mining regions with SAR intensity-based offset measurements. *Remote Sensing Letters*, 4(5):436–445, 2013. doi:10.1080/2150704X.2012.746482.
- Zhu J., Chang Z., Li X., Yu J., Yu W., Luo Y., Wang W., Wan X., Qian S. An improved atmospheric correction method in repeat-pass InSAR measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 39(21):7276–7292, 2018. ISSN 0143-1161. doi:10.1080/01431161.2018.1468112.