

## DYNAMIKA WYBRANYCH OBSZARÓW POLSKI W ŚWIETLE DANYCH SATELITARNEJ INTERFEROMETRII RADAROWEJ

### GEODYNAMICS OF THE SELECTED AREAS IN POLAND ON THE BASIS OF THE SATELLITE RADAR INTERFEROMETRY

MAREK GRANICZNY<sup>1</sup>, MARIA SURALA<sup>1</sup>, ZBIGNIEW KOWALSKI<sup>1</sup>, ANNA PIĄTKOWSKA<sup>1</sup>

**Abstrakt.** Jako obszary testowe wybrano trzy lokalizacje na terenie Polski charakteryzujące się odmiennym typem krajobrazu, różną budową geologiczną oraz użytkowaniem terenu. Są to: południowe wybrzeże Bałtyku w rejonie Zatoki Gdańskiej, fragment Niziny Mazowieckiej w obrębie aglomeracji warszawskiej oraz wybrane części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Do analizy przemieszczeń wykorzystano dwie metody: PSI (satelity ERS-1, ERS-2 i Envisat) oraz DifSAR (japoński satelita ALOS). Przedstawione przykłady wskazują dużą użyteczność analiz interferometrycznych dla monitorowania ciągłych, powolnych przemieszczeń na powierzchni terenu. Metoda ta powinna być również z powodzeniem wykorzystywana do oceny geozagrożeń związanych z osiadaniami, ruchami masowymi i niestabilnym podłożem.

**Słowa kluczowe:** interferometria satelitarna, interferometria radarowa, przemieszczenia powierzchni terenu, geozagrożenia.

**Abstract.** Three areas on the territory of Poland were selected as the test sites. They were characterized by different landscape, geological setting and land use. They cover southern coasts of the Baltic Sea around Gdańsk Bay, fragment of the Mazowian Lowland, including Warsaw agglomeration and selected parts of the Upper Silesian Coal Basin. Two methods were used for ground motion analysis: PSI (ERS-1, ERS-2 and Envisat satellites) and DifSAR (ALOS satellite). Examples presented show big potential of the interferometric analysis for monitoring of continuous, slow movements of the ground. This method should be widely used for evaluation of geohazards connected with subsidence, mass movements and unstable subsurface.

**Key words:** satellite interferometry, radar interferometry, ground motions, geohazards.

## WPROWADZENIE

W artykule zaprezentowano wybrane przykłady dynamiki przemieszczeń powierzchni terenu na podstawie analizy danych interferometrii satelitarnej. Jako obszary testowe wybrano trzy lokalizacje na terenie Polski charakteryzujące się odmiennym typem krajobrazu, różną budową geologiczną oraz użytkowaniem terenu. Są to: południowe wybrzeże Bałtyku w rejonie Zatoki Gdańskiej, fragment Niziny Mazowieckiej w obrębie aglomeracji warszawskiej oraz wybrane części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego.

Rozwój metod interferometrycznych należy wiązać z umieszczeniem systemów radarowych SAR (*synthetic aperture radar*) na orbicie okołoziemskiej pod koniec lat 70. XX wieku. Systemy te znalazły i znajdują szerokie zastosowanie w teledetekcji. Na początku lat 90., wykorzystując zjawisko interferencji fal, na podstawie danych satelitów ERS-1 i ERS-2 zaczęto generować interferogramy radarowe, umożliwiające tworzenie cyfrowych modeli terenu oraz rejestrację zmian powierzchni terenu z centymetrów

---

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; e-mail: marek.graniczny@pgi.gov.pl; maria.surala@pgi.gov.pl; zbigniew.kowalski@pgi.gov.pl; anna.piatkowska@pgi.gov.pl

trową dokładnością. W Polsce prace takie zostały podjęte na Uniwersytecie Śląskim przez Perskiego (1999). Ostatnie lata przyniosły dalszy rozwój interferometrii, opracowano system PSI (*persistent scatterer interferometry*). Materiał interferometryczny prezentowany w niniejszym artykule pozyskano w ramach współpracy PIG-PIB z konsorcjum TerraFirma (<http://terrafirma.eu.com>). TerraFirma dąży do zorganizowania i wdrożenia ogólnoeuropejskiego serwisu dostarczającego informacji na temat geozagrożeń związanych z przemieszczeniami powierzchni terenu, obejmującego ich identyfikację, ocenę, zrozumienie oraz monitoring.

Technika PSI obejmuje przetwarzanie kilkudziesięciu scen satelitów radarowych, począwszy od 1991 r. (wystrzelenie pierwszego satelity ERS-1). Uzyskuje się w ten sposób sieć punktów referencyjnych PS (*persistent scatterer* – tłumaczonych w Polsce jako stabilne rozpraszacze) zarejestrowanych w wyniku odbicia promieniowania radarowego od budynków, mostów i innych obiektów, na podstawie którego można obliczyć precyzyjnie pomiar fazowy. W rezultacie specjalistycznego przetwarzania powstaje unikatowy zbiór punktów na dużym terenie, który jest niezwykle trudny, bądź niemożliwy do uzyskania przy pomocy metod konwencjonalnych. Zbiór taki uzyskuje się przede wszystkim na terenach zurbanizowanych bądź przemysłowych, gdzie PS są znacznie łatwiej identyfikowane. Trudniejsze warunki występują natomiast na obszarach pokrytych roślinnością, która rozprasza wiązkę promieniowania radarowego.

Główne zalety satelitarnych metod interferometrycznych to:

- wysoka precyzja pomiarów, stopień przemieszczenia pomiędzy dwoma punktami w ciągu roku od  $\pm 0,1$  mm, przemieszczenie jednego punktu PS od 1 mm w kierunku wybierania („widzenia”) satelity (LOS) do 1 cm w kierunku wschód–zachód;
- maksymalne przemieszczenia, które mogą być rejestrowane przez satelity ERS-1 i ERS-2 lub inne w zakresie „C” wynoszą 14 mm w ciągu 35 dni;
- większa dokładność pomiarów w odniesieniu do składowej pionowej, w stosunku do odbiorników GPS;
- zebranie danych pomiarowych z dużego obszaru w szybkim czasie, jednorazowo do 2000 km<sup>2</sup>;
- niższe koszty w stosunku do geodezyjnych pomiarów naziemnych (niwelacja precyzyjna);

## DANE INTERFEROMETRYCZNE

Do analizy przemieszczeń na wybranych terenach Polski wykorzystano dwie metody: PSI (satelity ERS-1, ERS-2, Envisat i Terra – SAR-X) oraz DifSAR (japoński satelita ALOS). Dysponowano następującym zbiorem danych interferometrycznych:

- Górnośląskie Zagłębie Węglowe:
  - zestaw danych PSI z satelity ERS-1 i 2, pokrywający obszar 1215,8 km<sup>2</sup> w okolicach Sosnowca.

- bogaty zasób archiwalny danych z satelitów ERS-1 i ERS-2 umożliwiających przebieg ruchów na powierzchni terenu od 1992 r.;
- duża gęstość punktów pomiarowych, na terenach aglomeracji miejskich i przemysłowych – do 4000 punktów PS na kilometr kwadratowy;
- dane interferometryczne można łatwo przetransferować do formatu GIS;
- metoda powinna być używana jako komplementarna do monitoringu przy wykorzystaniu odbiorników GPS, niwelacji precyzyjnej, czy skaningu laserowego (naziemnego i powietrznego).

Przy interpretacji danych PSI należy jednak zdawać sobie sprawę z szeregu ograniczeń wynikających z dosyć skomplikowanej metodyki obliczeniowej i specyfiki zobrażeń radarowych:

- obliczone prędkości przemieszczeń mają charakter względny, tak w czasie jak i przestrzeni, gdyż są odnoszone do czasu wykonania sceny SAR obranej za referencyjną, a przestrzennie do jednego bądź kilku PS obranych za referencyjne (dla których przyjmuje się, że deformacja = 0 mm/rok);
- wartości deformacji odnoszą się do przyjętego modelu deformacji. Najczęściej, przy braku innych danych przyjmuje się model liniowy. Jeśli deformacja zanadto odbiega od modelu PS jest odrzucany;
- na dokładność wyznaczonych prędkości deformacji ma wpływ użyta liczba scen SAR oraz gęstość i rozmieszczenie rozpraszaczy PS w terenie.

Możliwości identyfikacji przemieszczeń na powierzchni terenu za pomocą technik interferometrycznych mogą być niezwykle atrakcyjne dla geologów z szeregu powodów:

- identyfikacji oraz monitoringu powierzchniowych ruchów masowych;
- identyfikacji oraz obserwacji osiadań zarówno powstałych w wyniku procesów naturalnych, jak i sztucznych;
- wnioskowania o współczesnej aktywności tektonicznej;
- wnioskowania na temat stabilności podłoża;
- identyfikacji przemieszczeń powstałych wskutek wstrząsów sejsmicznych;
- obserwacji linii brzegowej morza oraz stopnia erozji;
- prawidłowej lokalizacji infrastruktury budowlano-przemysłowej o znaczeniu strategicznym (zapory, elektrownie, rafinerie, wielokondygnacyjne budynki itp.).

Dane ilustrują prędkość przemieszczeń w okresie 1992–2003. Dane zostały przetworzone przez Tele-Rilevamento Europa w ramach projektu TerraFirma;

- zestawy danych PSI z satelity ERS-1 i ERS-2 oraz z satelity Envisat, pokrywające obszar 483,9 km<sup>2</sup> w okolicy miasta Katowice. Dane zostały przetworzone również przez Tele-Rilevamento Euro-

- pa w ramach projektu Doris – projekt z Siódmego Programu Ramowego Komisji Europejskiej (FP7/2007–2013) Grant Agreement nr 242 212. Dane z satelitów ERS obrazują prędkości przemieszczeń w okresie 1992–2000, z satelity Envisat w okresie 2003–2010. Dodatkowo do każdego zestawu danych został dołączony jeden interferogram różnicowy wykonany techniką DifSAR, jako uzupełnienie pokrycia danymi InSAR badanego obszaru (w wyniku dużych osiadań nie było możliwe uzyskanie pełnego pokrycia punktami PS, które ilustrują jedynie powolne, małe przemieszczenia; prążki interferometryczne uzyskane na interferogramach pozwoliły na pokrycie informacją o przemieszczeniu również terenów poddanych bardzo silnym osiadaniom);
- z satelity Envisat pokrywający obszar 488,7 km<sup>2</sup> w okolicy Będzina. Dane zostały przetworzone przez Gamma Remote Sensing w ramach projektu TerraFirma. Dane ilustrują prędkości przemieszczeń z okresu 2003–2010. Razem z danymi PSI zostały przetworzone 24 sceny z satelity ALOS-PALSAR, dzięki czemu otrzymano dodatkowo 16 interferogramów różnicowych z okresu 21.12.2006–01.01.2011. Podobnie jak w powyższym zestawie danych, uzyskane na interferogramach prążki uzupełniły informację o zaistniałych przemieszczeniach w miejscach, gdzie uzyskanie wiarygodnych punktów PS było niemożliwe z uwagi na szybkość osiadania gruntu;
  - zestaw 5 interferogramów różnicowych z satelity ALOS-PALSAR, obejmujący obszar 10 429,87 km<sup>2</sup>

między miastami Rybnik i Ostrawą (Republika Czeska). Dane obejmują okres 22.02.2007–27.05.2008. Dane zostały przetworzone również przez Gamma Remote Sensing w ramach projektu TerraFirma.

- Aglomeracja warszawska: dwa zestawy danych PSI z satelity ERS-1 i 2 oraz z satelity Envisat. Dane zostały przetworzone przez Altamira Information w ramach projektu PanGeo (projekt z Siódmego Programu Ramowego Komisji Europejskiej Grant Agreement nr 262371) dla okresów odpowiednio: ERS – 7.07.1992 – 1.12.2000 oraz Envisat – 01.11.2002 – 10.09.2010 i obejmują obszar 1099,7 km<sup>2</sup> miasta stołecznego Warszawy i okolic.
- Południowe wybrzeże Bałtyku w rejonie Zatoki Gdańskiej:
  - zestaw danych PSI z satelity ERS przetworzony przez Fugro NPA w ramach projektu Subcoast (projekt z Siódmego Programu Ramowego Komisji Europejskiej (FP7/2007-2013) Grant Agreement nr 242332) dla okresu 1992–2000. Dane obejmują obszar 4652,7 km<sup>2</sup> w okolicach Zatoki Gdańskiej;
  - zestaw danych z satelity TerraSAR-X przetworzony w ramach tego samego projektu. Zestaw zawiera dane pozyskane ze scen z okresu 30.04.2011 – 3.11.2011. Są to zarówno punkty PSI, jak i obraz koherencji i intensywności interferogramów tworzonych na potrzeby przetwarzania danych metodą PSI. Obrazy koherencji i intensywności pomagają w badaniach zmian linii brzegowej oraz interpretacji pokrycia terenu.

## WYNIKI INTERPRETACJI

### GÓRNOŚLĄSKIE ZAGŁĘBIE WĘGLOWE

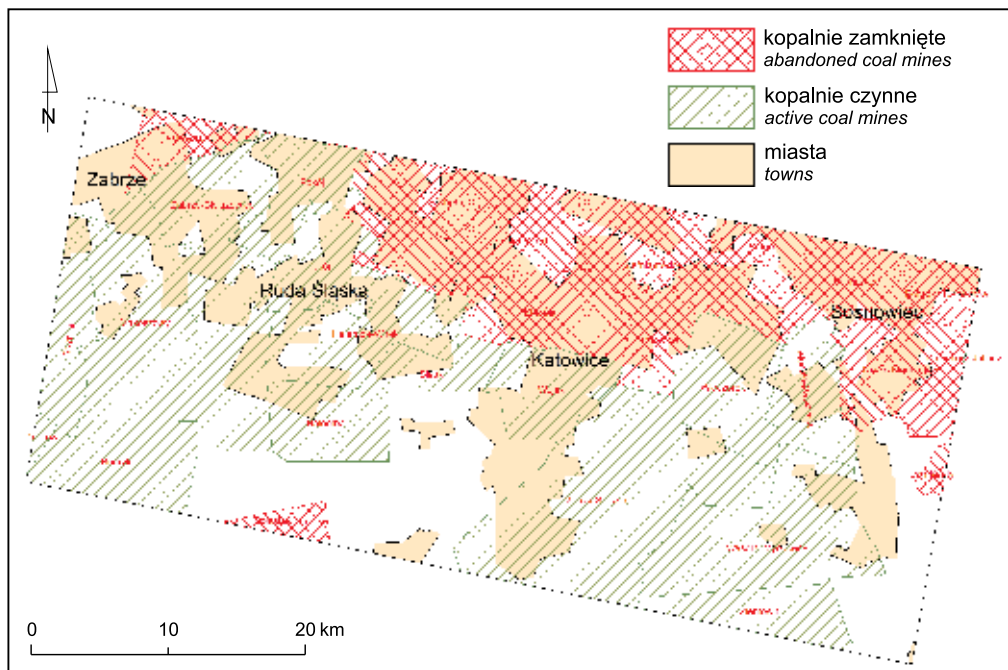
Najbogatszy materiał zgromadzono z obszaru Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (fig. 1). Stwierdzono tam występowanie osiadań terenu zarówno na obszarach górniczych (kopalni czynnych), jak również na terenach pogórniczych. Doszukano się związków danych interferometrycznych z głównymi uskokami, sejsmicznością oraz warunkami hydrogeologicznymi, jak również działalnością górniczą. Materiał ten był przedmiotem wielu publikacji (Graniczny, 2009; Graniczny i in., 2005, 2006a, b, c, d, 2007a, b, 2008a, b, c, d, 2011).

Aktualnie prowadzone są badania nad możliwością integracji i porównania danych pozyskanych z różnych źródeł w różnym okresie czasu w aspekcie zmian dynamiki powierzchni terenu GZW. Przedmiotem szczególnego zainteresowania jest obszar około 500 km<sup>2</sup> w okolicach Katowic. Występują tu kopalnie czynne (Sośnica, Pokój, Śląsk, Wieczorek, Wesoła-Mysłowice, Jadwiga, Knurów, Budryk, Ziemowit, Halemba-Wirek, Halmeba II, Wujek, Makoszowy, Murcki-Staszic) oraz nieczynne (Pstrowski, Barbara,

Polska-Wirek, Siemianowice, Kleofas, Katowice, Niwka-Modrzejów).

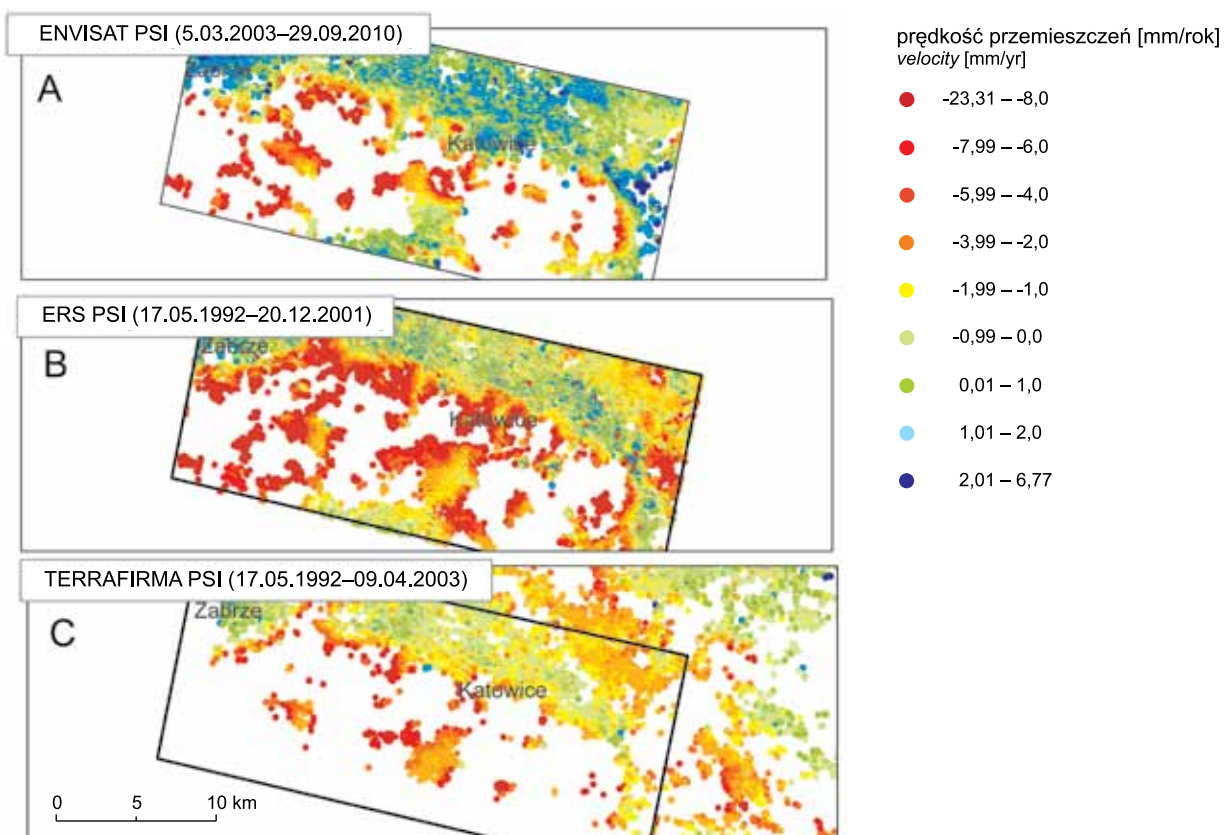
Przedmiotem analizy były trzy zestawy danych wykonane przez jednego wykonawcę przy pomocy jednego oprogramowania – Tele-Rilevamento Europa z Mediolanu, jedną z czołowych firm w zakresie przetwarzania danych interferometrycznych, co miało niewątpliwie wpływ na wysoką jakość materiału. Jeden zestaw pozyskano w ramach uczestnictwa w projekcie TerraFirma, a dwa pozostałe, w ramach projektu DORIS. Zestaw A obejmował 54 zobrazowania z satelitów ERS 1 i ERS 2 z lat 1992–2003, w wyniku których zarejestrowano 122 925 punktów PS. Zestaw B zawierał 70 zobrazowań, również z satelitów ERS-1 i ERS-2 z lat 1992–2001, obejmujący 71 709 punktów PS i wreszcie zestaw C, 31 zobrazowań satelity Envisat, z lat 2003–2010, który ma w rejestrze 32 341 punktów PS.

Dwa pierwsze zestawy danych obejmują podobny okres obserwacji (A – od 17.05.1992 do 9.04.2003 oraz B – od 17.05.1992 do 20.12.2001). Co jest interesujące, zestaw B rejestruje znacznie większą liczbę punktów PS wskazujących na osiadanie. Nie jest całkowicie jasne, co jest przy-



**Fig. 1. Fragment obszaru Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, objęty projektem DORIS**

Part of the Upper Silesian Coal Basin, area included in the DORIS project



**Fig. 2. Dane z satelity Envisat (A), ERS (B) z projektu DORIS oraz ERS (C) z projektu Terrafirma**

Data from Envisat (A) and ERS (B) satellites from DORIS project and ERS (C) from Terrafirma project

czyną zaistniałej różnicy. Wyraźna granica pomiędzy punktami PS wskazującymi na podnoszenie i osiadanie przebiega wzdłuż uskoku będzińskiego o kierunku WNW–ESE, którego skrzydło zrzucone znajduje się po stronie południowej. W ten sposób zarysowała się wyraźna anomalia liniowa podkreślona przez przeciwne ruchy przemieszczeń terenu. Ta i inne podobne anomalie liniowe na terenie GZW z reguły odpowiadają uskocom i granicom geologicznym, w tym wychodniom osadów karbonu produktywnego, tworzącym zagłębienie węglowe. Dlatego też, te liniowe anomalie można i należy interpretować jako powierzchniowe odzwierciedlenie aktywnych stref tektonicznych. Żadna dotychczas stosowana metoda teledetekcyjna nie dawała możliwości do tak daleko idących stwierdzeń. Dalsze studia w tym kierunku są pilnie pożądane.

Interesujące wnioski nasuwają się z porównania zestawów danych A i B z zestawem C, przedstawiającym najnowsze informacje – 5.03.2003 – 29.09.2010 (fig. 2). Punkty PS zlokalizowane w środkowej i południowej części analizowanego obszaru są podobne do zarejestrowanych w zestawach A i B, jakkolwiek wielkości osiadań są nieco niższe. Natomiast północna część obszaru różni się w zasadniczy sposób. Tam, gdzie w zestawach A i B przeważało niewielkie osiadanie, na nowszych zobrazowaniach przeważają PS stabilne, a nawet wskazujące na podnoszenie terenu. Zjawisko to zaznaczyło się na terenie zamkniętych kopalń. Najbardziej prawdopodobne wytłumaczenie tego zjawiska wiąże się ze zmianą warunków hydrogeologicznych i podnoszeniem się zwierciadła wód podziemnych, które może mieć również wpływ na niewielkie podniesienie powierzchni terenu, szczególnie w pobliżu strefy tektonicznej. Ponadto, w północno-wschodniej części GZW struktura petrograficzna pia-

skowców karbońskich jest nieco odmienna niż w pozostałej części zagłębienia. Zawierają one znaczne ilości substancji ilastych, charakteryzują się niską wytrzymałością i wysokimi naprężeniami, dlatego też mają tendencję do pęcznienia pod wpływem wody. Fakt ten może również wpływać na podnoszenie się terenu na tym obszarze.

Dane PSI pozyskane z satelitów ERS oraz Envisat oraz przetworzone w ramach projektu DORIS bardzo dobrze przedstawiają osiadania na terenach czynnych kopalni, jeżeli ich wartości nie przekraczają 30 mm w skali roku. Dane te nawiązują zarówno do danych Inwar, jak też do modeli przewidywanych osiadań. Jest to związane z faktem, że satelity operujące w paśmie C pozwalają na rejestrację maksymalnych przemieszczeń do 40 mm/rok. Natomiast na obszarze GZW obserwuje się osiadania w skali do 600 mm/rok, zwłaszcza tam, gdzie pod powierzchnią terenu przechodzi aktywny front robót górniczych. Dlatego też do rejestrowania podobnych przemieszczeń potrzebna jest inna technologia. Na przykład satelity w paśmie L (około 23 cm) na podstawie których można wygenerować interferogramy ilustrujące osiadania w tej skali (fig. 3). W niedługim czasie dla omawianego obszaru zostaną pozyskane dane satelitarne TerraSAR-X (pasmo X). Poszerzą one niewątpliwie wiedzę na temat możliwości wykorzystania interferometrii dla monitoringu osiadań.

Można stwierdzić z całą pewnością, że pojedynczy zestaw PSI jest niewystarczający do określenia wartości osiadania na terenie aktywnej eksploatacji górniczej. Wykonane na podstawie tych danych interferogramy dostarczają wprawdzie dodatkowych informacji, ale tylko w ograniczonym zakresie. Zazwyczaj obejmują one stosunkowo krótki okres obserwacji, od 90 do 138 dni. Z kolei zestaw danych

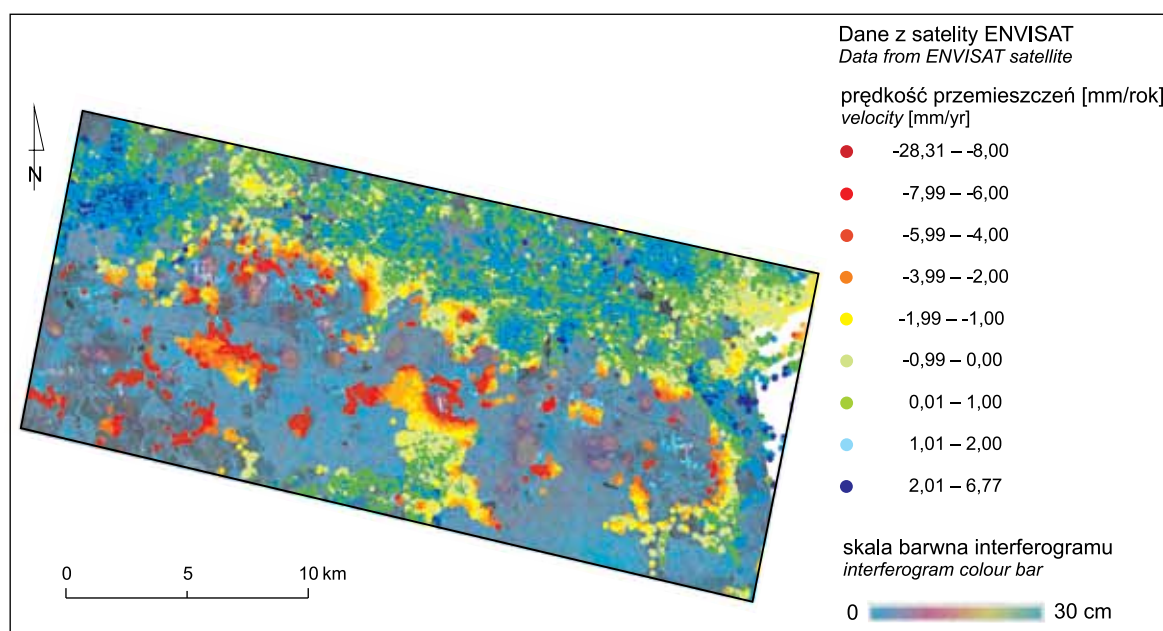


Fig. 3. Punkty PS z satelity Envisat (5.03.2003 – 29.09.2010) na tle interferogramu z satelity ALOS (projekt DORIS)

PS points from Envisat satellite (time span 5.03.2003 – 29.09.2010) superimpose with ALOS interferogram (DORIS project)

PSI charakteryzuje prędkości osiadań mierzonych w mm/rok, w okresie 7–8 lat. Biorąc powyższe pod uwagę, informacje otrzymane z bazy PSI oraz interferogramów nie można traktować bez zastrzeżeń bez przeprowadzenia walidacji (na przykład porównując z danymi niwelacji precyzyjnej). Jest jednak pewne, że tam, gdzie na obszarach zabudowanych nie zarejestrowano punktów PS osiadania są znaczące.

### AGLOMERACJA WARSZAWSKA

Na terenie aglomeracji warszawskiej większość analizowanego obszaru jest stabilna. Statystykę danych PS przedstawia tabela 1.

Z powyższego wynika, że ilość punktów PS zawartych pomiędzy  $-2$  do  $+2$  mm, uważanych za stabilne (biorąc również pod uwagę granicę błędów pomiaru), wynosi odpowiednio 96,2% (ERS) i 97,9% (Envisat) wszystkich zarejestrowanych punktów (fig. 4). Jest jednak interesujące, że w obrębie tarasu zalewowego Wisły zbudowanego z holocenijskich osadów rzecznych (piasków, żwirów, namulów itp.) punktów niestabilnych jest około 50% więcej w porównaniu do całego zbioru aglomeracji warszawskiej – 6,1 i 5,1 do 3,8 i 2,1 (fig. 5). Jest to istotne z uwagi na zagrożenia powodziowe i usytuowanie wałów przeciwpowodziowych, na których również zarejestrowano punkty PS wskazujące na osiadanie.

Można zatem przyjąć, że jednym z czynników mającym wpływ na osiadanie jest litologia osadów tarasu zalewowego. Na podstawie analizy statystycznej wyznaczono poligony wskazujące na nagromadzenie punktów niestabilnych. Znajdują się one w rejonie Goławia, Wawra, Falenicy oraz

**Tabela 1**

### Statystyka danych PS dla aglomeracji warszawskiej

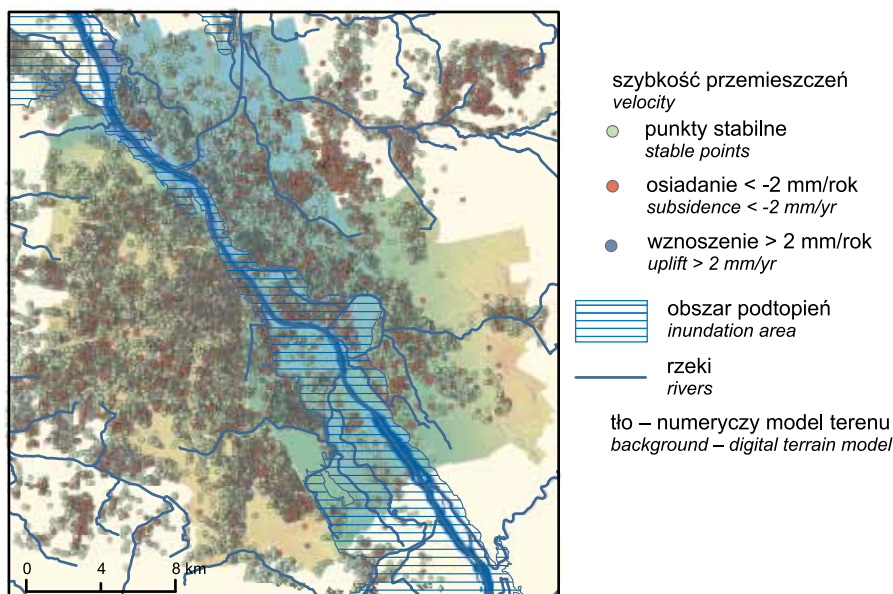
PS data statistics for the Warsaw agglomeration

Dla całego zbioru z Warszawy			
Satelita	wszystkie PS	PS VEL poza $\langle -2; 2 \rangle$	%
ERS	399 693	15 223	3,8
Envisat	190 511	3 996	2,1
Dla PS na tarasie zalewowym			
Satelita	wszystkie PS	PS VEL poza $\langle -2; 2 \rangle$	%
ERS	17 982	1 096	6,1
Envisat	6 777	344	5,1

elektrociepłowni Siekierki, również częściowo w obrębie tarasu zalewowego oraz tarasów wyższych.

W obrębie aglomeracji warszawskiej stwierdzono również liczne PS wskazujące na osiadanie wzdłuż niemal wszystkich kolejowych ciągów komunikacyjnych:

- linia średnicowa, pomiędzy dworcami Warszawa Zachodnia i Warszawa Wschodnia oraz dalej w kierunku zachodnim do Włoch i Piastowa. Około 7% wszystkich zarejestrowanych na torach punktów wykazuje wartości osiadania od 2 do 8 mm/rok. Nie stwierdzono natomiast mobilności nad tunelem linii średnicowej, pomiędzy przystankami Warszawa Ochota i Warszawa Powiśle;
- linia kolejowa na wschód od Warszawy Wschodniej, w rejonie osiedla Utrata, wzdłuż ulic Zabranieckiej



**Fig. 4. Punkty PS z satelity Envisat dla obszaru Warszawy na tle numerycznego modelu i obszarów podatnych na podtopienia**

PS points from Envisat satellite for Warsaw area on the background of Digital Terrain Model and areas prone to inundation

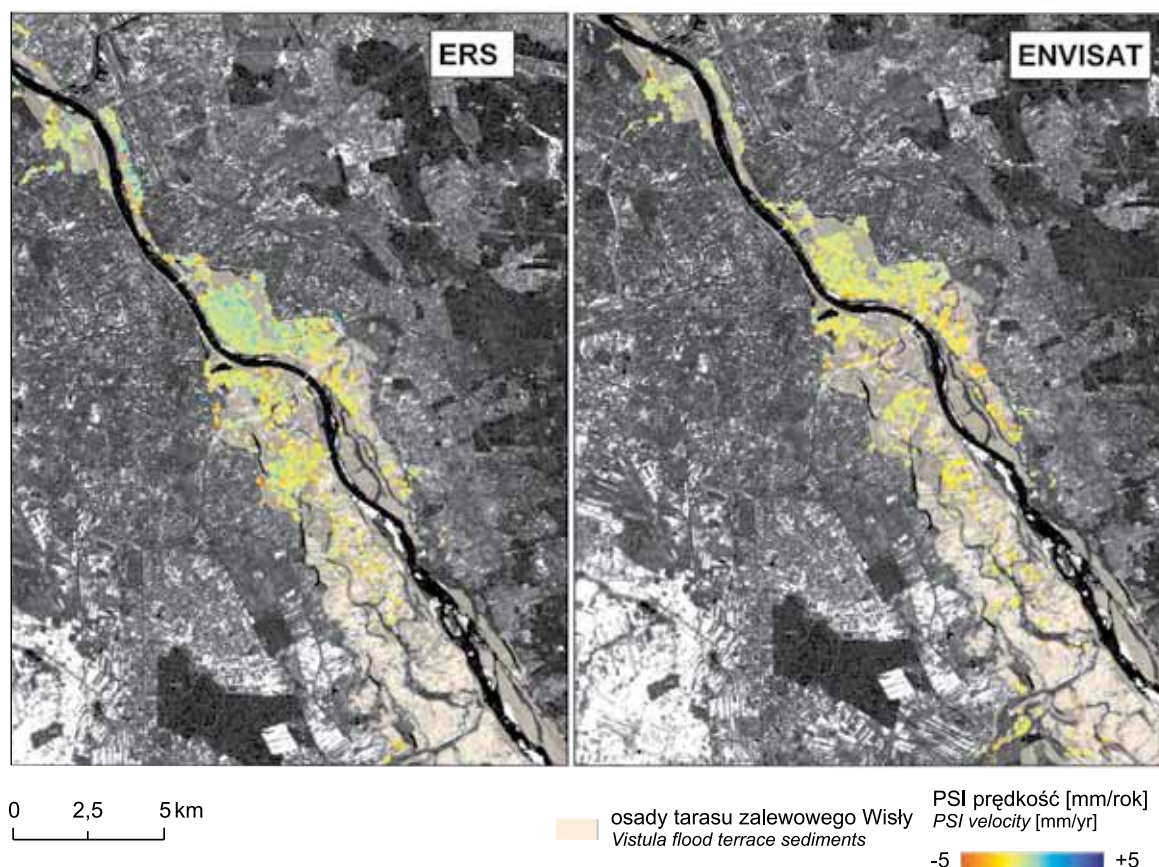


Fig. 5. Punkty PS z satelity ERS i Envisat znajdujące się na tarasie zalewowym Wisły

PS points from ERS and Envisat satellite on the flood terrace sediments of the Vistula River

i Gwarków. Zarejestrowane w tym rejonie punkty wykazują osiadanie nawet do 13 mm/rok;

- tory w rejonie stacji Warszawa Olszynka Grochowska oraz zajezdni kolejowej. Około 5% wszystkich zarejestrowanych punktów wykazuje wartości osiadania od 2 do 7 mm/rok;
- linia kolejowa w kierunku Otwocka na odcinku Wawer–Józefów. Aż 15% wszystkich zarejestrowanych na torach punktów wykazuje osiadanie sięgające do 9 mm/rok;
- tory kolejowe pomiędzy stacjami Żerań Wschodni i Warszawa Toruńska wzdłuż ulicy Marywilskiej. Około 11% wszystkich punktów z tego obszaru wykazuje osiadanie, najniższa rejestrowana wartość to 8 mm/rok.

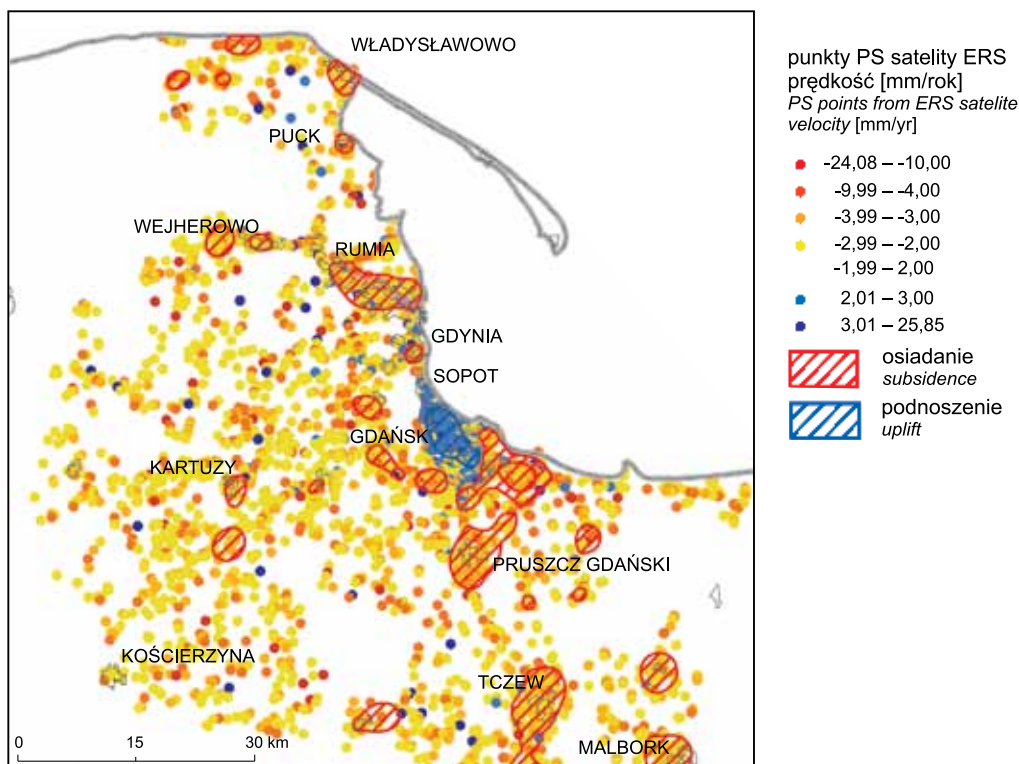
Osiadanie terenu wzdłuż linii kolejowych wydaje się być spowodowane obciążeniami dynamicznymi związanymi z ruchem taboru kolejowego. Podobne zjawisko zaobserwowano na odcinku Alei Krakowskiej, na odcinku pomiędzy Jankami a Starym Sękocinem.

Szczegółowa analiza satelitarnych danych interferometrycznych Warszawy jest aktualnie przedmiotem analiz oraz w trakcie przeprowadzania wizji terenowej.

## ZATOKA GDAŃSKA

Rejon Zatoki Gdańskiej był również przedmiotem wcześniejszych analiz (Graniczny i in., 2007c, 2008e, 2011, 2012). Na terenie aglomeracji Gdańska, Sopotu i Gdyni, charakteryzującej się na ogół stabilnością, stwierdzono występowanie ruchów obniżających (Uścińowicz i in., 2010). Największe stwierdzono na obszarze rafinerii gdańskiej, gdzie odnotowano osiadania ponad centymetr na rok. Zarejestrowano także punkty, gdzie teren podnosi się (wartości kilkumilimetrowe).

Głównym przedmiotem analiz był zestaw danych PSI z satelity ERS dla okresu 4.05.1992–7.12.2000. Wśród 78 tysięcy punktów PS, pokrywających obszar Zatoki Gdańskiej pomiędzy Karwią na północnym zachodzie a Malborkiem na południowym wschodzie, prawie 90% punktów charakteryzuje się wartościami w zakresie od  $-2$  do  $+2$  mm/rok. Są to punkty, które tak jak w poprzednich prezentowanych badaniach można uznać za stabilne. Mimo to, na badanym obszarze zaobserwowano kilkanaście miejsc charakteryzujących się dużym skupieniem punktów PS o wartościach spoza zakresu stabilnego. Aby ułatwić rzetelną identyfikację



**Fig. 6.** Wyznaczone geostatystycznie poligony ilustrujące miejsca o dużym nagromadzeniu punktów PS o wartościach przemieszczenia większych niż 2 mm/rok. Poligony czerwone oznaczają miejsca osiadające, niebieskie podnoszące. Pominięto punkty PS uznane za stabilne w przedziale  $-1,99-2,00$  mm/rok

Designated by geo-statistic polygons showing the location of high concentration of PS points with values of velocity of displacement greater than 2mm/year. Red polygons indicate the subsiding places, the blue uplifting. Not shown PS points considered as stable in the range of  $-1.99-2.00$  mm/yr

takich obszarów, wykonano analizę geostatystyczną całego zbioru. W pierwszym kroku wykonano mapę gęstości punktów PS, wagowanych po wartości prędkości przemieszczenia. Następnie na otrzymanej mapie zidentyfikowano miejsca silnie osiadające lub silnie podnoszące. Poprzez wybór konkretnych warstwic mapy gęstości, otrzymano zbiór poligonów ilustrujących miejsca, w których można zauważyć trend przemieszczenia. Ostatnim krokiem była wizualna weryfikacja otrzymanych poligonów ze zbiorem punktów PS (fig. 6).

W wyniku tak przeprowadzonej analizy zidentyfikowano kilkanaście miejsc, gdzie średnie wartości osiadania sięgają od  $-3$  mm/rok do  $-5$  mm/rok. Przykładami takich miejsc są: rafineria gdańska, Błota Kawińskie, czy tory kolejowe w miejscowości Subkowy. Przyczyny osiadań mogą być różne, prawdopodobnie jest to związane z litologią osadów i parametrami geotechnicznymi gruntu.

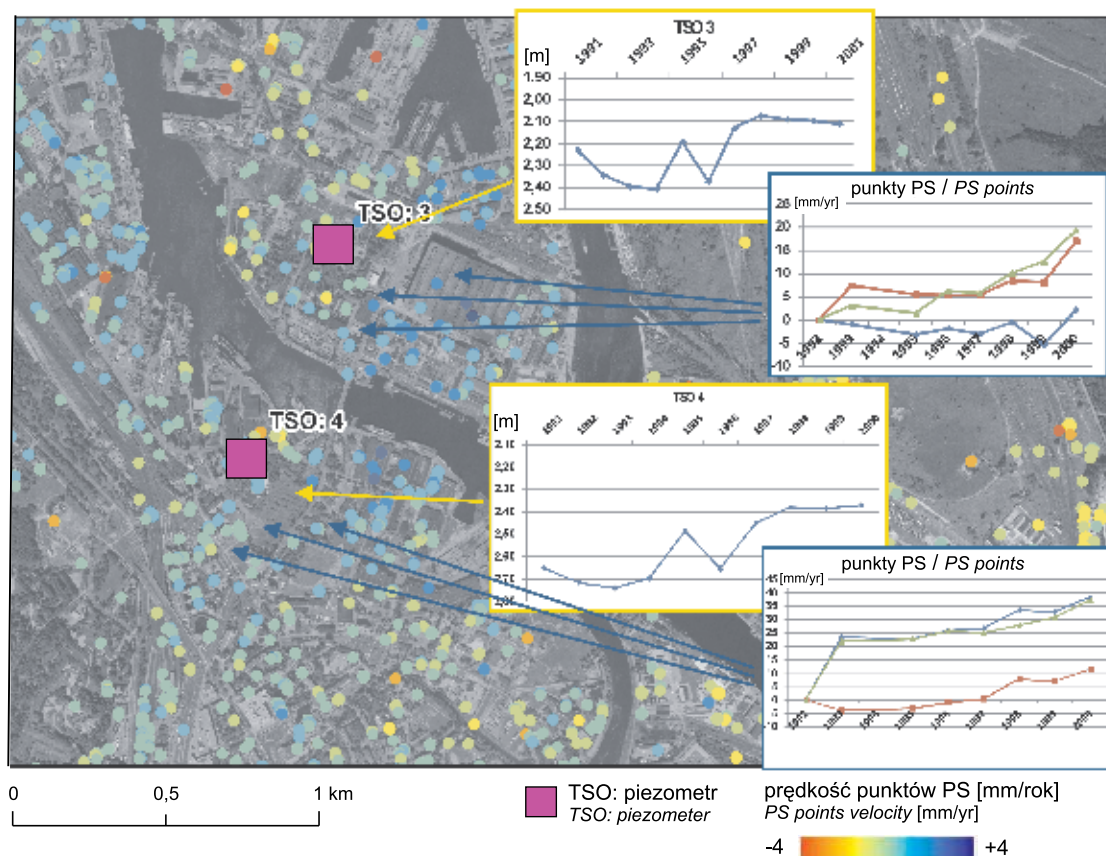
Wśród zidentyfikowanych poligonów wyróżniono jeden z tendencją do podnoszenia na obszarze Gdańska, szczególnie na obszarze stoczni. Średnia wartość wszystkich punktów PS znajdujących się w tym obszarze wynosi  $+2,5$  mm/rok. Dla wybranych punktów stworzono wykresy czasowe, przedstawiające względne do jednej wybra-

nej sceny referencyjnej wartości przemieszczeń w funkcji czasu. Wykresy umożliwiają analizę trendu zaistniałych przemieszczeń na przestrzeni kolejnych lat. Trend wykresu jest niejako odzwierciedleniem wartości punktu PS – wartość dodatnia będzie skutkowałą wykresem o linii trendu wznoszącej, wartość ujemna będzie oznaczała opadającą linię trendu. Wykresy służą do szczegółowej analizy trendu przemieszczeń.

Analiza porównawcza wykresów czasowych punktów PS wraz z wykresami piezometrów z tego samego okresu, wykazała ścisły związek pomiędzy podnoszeniem się terenu stoczni gdańskiej a podnoszeniem się poziomu wód gruntowych (fig. 7). Fakt ten potwierdza również historia eksploatacji ujęć wód podziemnych czwartorzędu w Gdańsku (Kozerski i in., 2005), gdzie w okresie 1992–2000 eksploatacja stopniowo zmniejszała się, od ok.  $3250$  m<sup>3</sup>/h do ok.  $1600$  m<sup>3</sup>/h, co prawdopodobnie przyczyniło się do podnoszenia poziomu wody gruntowej i w konsekwencji podnoszenia terenu.

W dalszej kolejności planowane są szczegółowe analizy wybranych obszarów. Wyniki interferometrii radarowej pozwolą również na weryfikację istniejących map zagrożenia powodziowego.





**Fig. 7. Wykresy czasowe wybranych punktów PS w zestawieniu z wykresami piezometrów na terenie stoczni gdańskiej. Wykazany jest związek pomiędzy podnoszeniem się poziomu wody gruntowej a podnoszeniem się gruntu zarejestrowanym za pomocą interferometrii radarowej (punktów PS)**

Time series of selected PS points in comparison with the graphs of piezometers in the Gdańsk Shipyard. Demonstrated is the connection between the groundwater level rise and ground uplift registered by radar interferometry (PS points)

## PODSUMOWANIE

Przedstawione przykłady wskazują dużą użyteczność analiz interferometrycznych dla monitorowania ciągłych, powolnych przemieszczeń na powierzchni terenu. Metoda ta powinna być również z powodzeniem wykorzystywana dla oceny geozagrożeń związanych z osiadaniem, ruchami masowymi i niestabilnym podłożem.

Analiza interferometryczna w naszym kraju powinna być kontynuowana na obszarze GZW, który można w tej chwili traktować, jako wzorcowy teren testowy w skali europejskiej.

Ponadto powinna obejmować: obszary podziemnej eksploatacji górniczej (węglowodory, cynk i ołów, sól kamienna itp.), duże obiekty przemysłowe (planowane i istniejące), w tym elektrownie jądrowe, duże aglomeracje miejskie (w pierwszej kolejności tam, gdzie wykonano atlasy geologiczno-inżynierskie), rejony potwierdzonych ruchów masowych (przede wszystkim tam, gdzie nie występują obszary leśne), obszary zagrożone powodzią oraz strefę brzegową Bałtyku.

## LITERATURA

- GRANICZNY M., 2009 — Sosnowiec, Poland. *W: The TerraFirma Atlas – The terrain-motion information service for Europe* (red. R. CAPES, S. MARSH S.), GMES – ESA, June 2009. TerraFirma project, ESA publication: 34; <http://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/TerraFirmaAtlas/pageflip.html>
- GRANICZNY M., KOWALSKI Z., CZARNOGÓRSKA M., 2005 — TerraFirma Project – monitoring of subsidence of the northeastern part of the Upper Silesian Coal Basin; Mass movements hazard in various environments: 18–19. Abstracts and Field Trip Guide-Book, Centre of Excellence REA, Polish Geological Institute, Warszawa.
- GRANICZNY M., KOWALSKI Z., JURECZKA J., CZARNOGÓRSKA M., 2006a — Practical Application of TerraFirma PS-InSAR in Poland: 25–26. 26th EARSeL Symposium, May 29–June 2, Warsaw, Poland. EARSeL and Institute Geodesy and Cartography, Warsaw.
- GRANICZNY M., KOWALSKI Z., JURECZKA J., CZARNOGÓRSKA M., 2006b — TerraFirma Project – monitoring of subsidence of northeastern part of the Upper Silesian Coal Basin. *Pol. Geol. Inst. Sp. Pap.*, **20**: 59–63.
- GRANICZNY M., KOWALSKI Z., JURECZKA J., CZARNOGÓRSKA M., 2006c — Wykorzystanie technologii PSInSAR dla obserwacji przemieszczeń powierzchni terenu na przykładzie Górnego Śląska. Warsztaty Górnicze 2006, z cyklu „Zagrożenia naturalne w górnictwie”. Wyd. IGSME PAN, Kraków.
- GRANICZNY M., CZARNOGÓRSKA M., JURECZKA J., KOWALSKI Z., PIĄTKOWSKA A., 2006d — Application of PS interferometry for identification of geohazards – case study the Upper Silesian Coal Basin. The abiotic environment evaluation of changes and hazards – case study. Abstracts Volume: 16–17. Centre of Excellence REA, Polish Geological Institute, Warszawa.
- GRANICZNY M., LEŚNIAK A., PORZYCKA S., 2007a — Detekcja długookresowych, pionowych przemieszczeń gruntu na terenach górniczych kopalń Zagłębia Dąbrowskiego z zastosowaniem technologii PSInSAR. *Bezpieczeństwo pracy i ochrona środowiska w górnictwie*, **6**: 30–32.
- GRANICZNY M., KOWALSKI Z., LEŚNIAK A., CZARNOGÓRSKA M., PIĄTKOWSKA A., 2007b — Analysis of the PSI data from the Upper Silesia – SW Poland: 17. The International Geohazard Week 5–9 November 2007 ESA-ESRIN Frascati Rome, Italy. The International Forum on Satellite EO and Geohazards.
- GRANICZNY M., KOWALSKI Z., CZARNOGÓRSKA M., JURECZKA J., PIĄTKOWSKA A., 2007c — Potential of SAR interferometry for identification ground motions, Living Morphotectonics of the European Lowland Area: 181. August 28–30.2006, Cedynia, Poland. Polish Geological Institute.
- GRANICZNY M., KOWALSKI Z., JURECZKA J., CZARNOGÓRSKA M., PIĄTKOWSKA A., 2008a — Preliminary interpretation of PSI data of the northeastern part of the Upper Silesian Basin (Sosnowiec test site) – TerraFirma project. *Pol. Geol. Inst. Sp. Pap.*, **24**: 29–35.
- GRANICZNY M., PIĄTKOWSKA A., CZARNOGÓRSKA M., KOWALSKI Z., 2008b — Geohazards in Poland – REA WP3 activity. *Pol. Geol. Inst. Sp. Pap.*, **24**: 37–43.
- GRANICZNY M., CZARNOGÓRSKA M., KOWALSKI Z., WEGMÜLLER U., 2008c — Dynamika zmian powierzchni terenu na Górnym Śląsku w okresie 10.07–25.08.2007 r. na podstawie danych interferometrycznych z satelity ALOS. *Prz. Geol.*, **56**, 7: 524–527.
- GRANICZNY M., CZARNOGÓRSKA M., KOWALSKI Z., LEŚNIAK A., JURECZKA J., 2008d — Metoda punktowej, długookresowej satelitarnej interferometrii radarowej (PSInSAR) w rozpoznaniu geodynamiki NE części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. *Prz. Geol.*, **56**, 9: 826–835.
- GRANICZNY M., PIOTROWSKI A., PIĄTKOWSKA A., KOWALSKI Z., WASOWSKI J., BOVENGA F., CYZIENE J., SATKUNAS J., 2008e — Ground motion observations in the European Lowland areas based on satellite interferometry method. The 33rd International Geological Congress, Oslo, the 33rd IGS publication: 154, Printed by Charlesworth Group, Wakefield, UK.
- GRANICZNY M., BOVENGA F., KOWALSKI Z., PERSKI Z., PIĄTKOWSKA A., SURAŁA M., UŚCINOWICZ SZ., WASOWSKI J., ZDANOWSKI A., 2011 — Problematyka wykorzystania interferometrii satelitarnej w badaniach geologicznych. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **446**, 1: 53–64.
- GRANICZNY M., CZARNOGÓRSKA M., UŚCINOWICZ S., NUTRICATO R., TRIGGIANI S., NITTI D.O., BOVENGA F., WASOWSKI J., 2012 — Analiza deformacji powierzchniowych wzdłuż południowo-zachodnich wybrzeży Zatoki Gdańskiej z zastosowaniem satelitarnych danych interferometrycznych. *Prz. Geol.*, **60**, 4: 206–211.
- KOZERSKI B., JAWORSKA-SZULC B., PRUSZKOWSKA M., PRZEWŁÓZKA M., 2005 — Wylądanie się wód podziemnych w piętrze czwartorzędowym Gdańska jako rezultat zmniejszonego poboru. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, **12**: 371–375. Wyd. UAM, Toruń.
- UŚCINOWICZ S., CZARNOGÓRSKA M., WASOWSKI J., JEGLIŃSKI W., 2010 — Satellite interferometry analysis of ground deformations along the south western coast of the Gulf of Gdańsk. The Baltic Sea Geology – 10, 24–28 August 2010. VSEGEI, St. Petersburg, Russia, Abstracts Volume: 36–37, Press VSEGEI, St. Petersburg.

## SUMMARY

Dynamics of ground motions was presented based on the analysis of satellite interferometry. Three areas on the territory of Poland were selected as the test sites. They were characterized by different landscape, geological setting and land use. They cover: southern coasts of Baltic Sea around Gdańsk Bay, fragment of the Mazovian Lowland, including Warszawa agglomeration and selected parts of the Upper Silesian Coal Basin (USCB). Two methods were used for ground motion analysis: PSI (ERS-1, ERS-2 and Envisat satellites) and DfSAR (ALOS satellite). The biggest collection of interferometric data was gathered at the territory of USCB. The subsidence of the ground was confirmed above the active mines as well as above the inactive mines and post mining areas. Interesting correlations were found between interferometric data, main fault zones, seismicity and hydrogeological conditions.

At the area of the Warszawa agglomeration most of the area is stable. However within the Vistula flood plain terraces

and flood embankments some subsidence was observed up to 20 mm/year. One of the factors of this subsidence could be lithological composition of alluvial sediments. The subsidence was also observed along the several sections of the Warszawa railway system.

Area of the Gdańsk, Sopot, Gdynia agglomeration is generally stable. Anyway in some places uplift of several millimeters per year was registered. Such situation was observed in the area of Gdańsk shipyard. It is probably connected with reduced extraction of groundwater. On the contrary, at the territory of the Gdańsk refinery, substantial subsidence is visible up to 1 cm/year.

Presented examples are showing big potential of the interferometric analysis for monitoring of continuous, slow movements of the ground. This method should be widely used for evaluation of geohazards connected with: subsidence, mass movements and unstable subsurface.

