

## PROBLEMATYKA WYKORZYSTANIA INTERFEROMETRII SATELITARNEJ W BADANIACH GEOLOGICZNYCH

### ISSUES CONCERNING THE APPLICATION OF SATELLITE INTERFEROMETRY IN GEOLOGICAL INVESTIGATIONS

MAREK GRANICZNY<sup>1</sup>, FABIO BOVENGA<sup>5</sup>, ZBIGNIEW KOWALSKI<sup>1</sup>, ZBIGNIEW PERSKI<sup>2</sup>, ANNA PIĄTKOWSKA<sup>1</sup>,  
MARIA SURALA<sup>1</sup>, SZYMON UŚCINOWICZ<sup>3</sup>, JANUSZ WASOWSKI<sup>6</sup>, ALBIN ZDANOWSKI<sup>4</sup>

**Abstrakt.** Przedstawiono problematykę wykorzystania interferometrii radarowej do badania geodynamiki i ruchów powierzchni terenu wybranych obszarów Polski. Zinterpretowano wyniki tej metody dla Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) oraz południowego wybrzeża Bałtyku w rejonie Zatoki Gdańskiej. Omówiono możliwości i ograniczenia satelitarnej techniki radarowej do badania analizy przemieszczeń powierzchni terenu. Dla obszaru GZW zastosowano dwie metody: PSI (satelity ERS-1 i ERS-2) oraz DifSAR (japoński satelita ALOS), które wykazały dużą użyteczność w badaniach osiadań terenu na obszarach górniczych i pogórnich. Do analizy geodynamiki południowego wybrzeża Bałtyku w rejonie Zatoki Gdańskiej zastosowano metodę PSI. Zaobserwowano, że przeważająca część aglomeracji Gdańska, Gdyni i Sopotu jest stabilna lub prawie stabilna. Jednym z wyjątków jest obszar rafinerii gdańskiej, gdzie odnotowano osiadania sięgające –12 mm/rok. Stwierdzono, że interferometria radarowa jest bardzo przydatna do oceny ruchów powierzchni terenu – zagadnienia często rozpatrywanego w praktyce geologiczno-inżynierskiej.

**Słowa kluczowe:** interferometria radarowa, teledetekcja satelitarna, deformacje terenu, ruchy powierzchni terenu, geologia inżynierska.

**Abstract.** The questions of the satellite interferometry method application for research studies of the geodynamics and ground movements in selected areas of Poland have been presented in this paper. The results of interferometric analysis from Upper Silesian Coal Basin (USCB) and Southern Baltic Coasts in the region of Gdańsk Bay were revealed. The advantages and limitations of the satellite interferometry for the ground movements studies have been also discussed. In the USCB area two interferometric methods were applied: PSI (based on the analysis of the data from satellites ERS-1 and ERS-2) and DifSAR (based on the analysis of the data from the Japanese satellite – ALOS). The results of interpretation have shown big utility for investigations of subsidence at the mining and post mining areas. On the basis of the PSI analysis of Southern Baltic Coasts several interesting phenomena have been observed. It was confirmed that predominant part of Gdańsk-Gdynia-Sopot agglomeration is stable or nearly stable. One exception has been observed in the region of the Gdańsk Refinery, where the subsidence rate of 12 mm/year was confirmed. On the basis of the presented examples it could be concluded that the satellite interferometry is extremely useful for ground movement studies in the engineering-geological practice.

**Key words:** satellite interferometry, satellite remote sensing, terrain deformations, ground motions, engineering geology.

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; Marek.Graniczny@pgi.gov.pl, Zbigniew.Kowalski@pgi.gov.pl, Anna.Piatkowska@pgi.gov.pl, Maria.Surala@pgi.gov.pl

<sup>2</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Karpacki, ul. Skrzatów 1, 31-560 Kraków; Zbigniew.Perski@pgi.gov.pl

<sup>3</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Geologii Morza, ul. Kościarska 5, 80-328 Gdańsk; Szymon.Uscinowicz@pgi.gov.pl

<sup>4</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Górnośląski, ul. Królowej Jadwigi 1, 41-200 Sosnowiec; Albin.Zdanowski@pgi.gov.pl

<sup>5</sup> CNR-ISSIA, Via Amendola 122/D, 70126, Bari, Włochy; bovena@ba.issia.cnr.it

<sup>6</sup> CNR-IRPI, Via Amendola 122/I, 70126, Bari, Włochy; j.wasowski@ba.irpi.cnr.it

## WSTĘP

Początki techniki radarowej sięgają lat trzydziestych XX wieku. Jej ogromny postęp zaznaczył się w trakcie II wojny światowej, kiedy radary stosowano do celów radionawigacji i rozwoju systemów wczesnego ostrzegania. Skonstruowane wówczas pierwsze mikrofalowe radary obrazowe (H2S), wspomagające nocne bombardowania obiektów na terenie III Rzeszy, stały się podstawą do rozwoju obrazowych radarów bocznego wybierania (SLAR). Po wojnie systemy radarowe (SLAR), umieszczone na samolotach, pozwoliły na otrzymywanie obrazów przestrzennych i były wykorzystywane również do celów kartograficznych (w tym szpiegowskich). Rozwinięciem systemu SLAR były radary bocznego obrazowania z anteną syntetyczną SAR (*Synthetic Aperture Radar*), które dzięki metodom zaawansowanej obróbki sygnału pozwalają na uzyskanie wysokorozdzielczych obrazów niezależnie od wysokości lotu i rozmiarów anteny. Urządzenia SAR wykorzystano po raz pierwszy na szeroką skalę do rozpoznania lotniczego w czasie wojny wietnamskiej. Pod koniec lat 70. systemy radarowe umieszczono na orbicie okołoziemskiej (SAR). Znalazły one i znajdują nadal 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 (technika DfSAR), umożliwiające tworzenie cyfrowych modeli terenu oraz rejestrację zmian powierzchni z dokładnością centymetrową. 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, dla rejonu Sosnowca pozyskano w ramach współpracy PIG – PIB z konsorcjum TerraFirma (<http://terrafirma.eu.com>) oraz dla rejonu Gdańsk przy współpracy z Włoską Akademią Nauk (CNR), instytutami naukowymi ISSIA i IRPI oraz Europejską Agencją Kosmiczną (ESA) w ramach projektu CAT-1 nr 4416. TerraFirma dąży do zorganizowania i wdrożenia ogólnoeuropejskiego serwisu dostarczającego informacje na temat zagrożeń związanych z przemieszczeniami powierzchni ziemi, obejmującego ich identyfikację, ocenę, zrozumienie oraz monitoring.

Technika PSI została zapoczątkowana w latach 90. Bazuje ona na przetwarzaniu kilkudziesięciu zobrażeń radarowych tego samego terenu, zarejestrowanych w różnym czasie. Umożliwia wyznaczenie powolnych przemieszczeń pionowych w miejscach charakteryzujących się silnym i słabo zmiennym w czasie odbiciem wiązki fali (Ferretti i in., 2000, 2001). Są to tzw. stabilne rozpraszacze (Perski i in., 2007) (PS, *Permanent Scatterers* lub *Persistent Scatterers*). Zbiór punktów PS uzyskuje się przede wszystkim na terenach zurbanizowanych bądź przemysłowych, gdzie obiekty terenowe, takie jak budynki, mosty, wiadukty, latarnie, stanowią zbiór naturalnych PS. Trudniejsze warunki występują natomiast na obszarach pokrytych roślinnością, która inaczej rozprasza wiązkę promieniowania radarowego (odbicie objętościowe tzw. *volume scattering*), przez co rozpraszaczy

typu PS jest tam znacznie mniej. W procesie przetwarzania danych otrzymuje się względne wartości prędkości przemieszczenia w kierunku padania wiązki radarowej w poszczególnych punktach PS. Dokładność ich wyznaczenia jest zależna m.in. od liczby wykorzystanych scen, odległości bazowej, dokładności użytego numerycznego modelu terenu czy też precyzji wyeliminowania zakłócenia atmosferycznego. Uważa się, że technika PSI pozwala wyznaczyć prędkość przemieszczenia rzędu nawet 1 mm/rok (Perski, Mróz, 2008).

Przy interpretacji danych PSI należy jednak zdawać sobie sprawę z szeregu ograniczeń wynikających z dość skomplikowanej metodyki obliczeniowej:

1. Obliczone prędkości mają charakter względny tak w czasie, jak i w przestrzeni, gdyż są odnoszone do czasu wykonania sceny SAR obranej za referencyjną, a przestrzenie do jednego bądź kilku PS obranych za referencyjne (dla których przyjmuje się, że deformacja wynosi 0 mm/rok).

2. 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.

3. Na dokładność wyznaczonych prędkości deformacji ma wpływ użyta liczba scen SAR, a także gęstość i rozmieszczenie rozpraszaczy PS w terenie.

Pomimo ograniczeń, możliwości identyfikacji przemieszczeń na powierzchni terenu za pomocą techniki PSI 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,
- lokalizacji infrastruktury budowlano-przemysłowej o znaczeniu strategicznym (zapory, elektrownie, rafinerie, wielokondygnacyjne budynki itp.).

Większość realizowanych obecnie w naszym kraju projektów jest ukierunkowana na identyfikację osiadań na terenach zurbanizowanych oraz na badania osuwisk. Badania te prowadzono na różnych obszarach testowych, pozyskując materiały głównie w wyniku współpracy międzynarodowej i przy udziale Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego w projektach takich jak: TerraFirma, MELA, SUBCOAST, DORIS, PanGeo i inne. Poniżej przedstawiono szereg przykładów zastosowania interferometrii satelitarnej w Polsce ze szczególnym uwzględnieniem Górnośląskiego Zagłębia Węglowego oraz południowego wybrzeża Bałtyku w rejonie Zatoki Gdańskiej.

## GÓRNOŚLĄSKIE ZAGŁĘBIE WĘGLOWE

Obszar Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) z uwagi na intensywną eksploatację górnictwem oraz wysoki stopień urbanizacji stał się priorytetowym terenem w Polsce dla badań interferometrycznych. Obecnie jest też uznany za jeden z pilotowych obszarów badawczych w Europie.

Zbiór danych sceny „Sosnowiec” zawiera 30 869 punktów PS. Zostały one przetworzone przez Tele Rilevamento Europa T.R.E. SRL z Włoch na podstawie 78 scen z satelitów ERS-1 i ERS-2 z lat 1992–2003. Średnia szybkość przemieszczenia się punktów (mm/rok) waha się od –23 do 7,6 mm. Jeśli chodzi o wartości skrajne, to zarejestrowano 2 punkty o wartościach poniżej –20 mm, 28 punktów mieszczących się w granicach od –20 do –15 mm oraz 7 punktów o wartościach powyżej 3 mm.

Do analizy wyżej wymienionych danych odpowiednie są metody geostatystyczne, które stosuje się we wszystkich tych przypadkach, gdy parametry zostały pomierzone tylko w wybranych punktach przestrzeni lub czasu i wartości te są zależne od wartości parametru w punktach sąsiednich.

Warto zwrócić uwagę na współzależność przestrzennego rozmieszczenia PS z granicami geologicznymi. W skali regionalnej stwierdzono zbieżność rozmieszczenia obszarów obniżających się z układem strukturalnym utworów karbonu, która jest zbyt oczywista, by mogła być przypadkowa. Kilka liniowych stref PS bez wątpliwości wskazuje na ich związek z geologią.

Należy jednak zauważyć, że związek ten niekoniecznie musi odzwierciedlać zmiany neotektoniczne, gdyż obszar GZW jest od kilku stuleci terenem intensywnego wydobywania podziemnego złóż srebra, cynku i ołowiu oraz węgla kamiennego. Największy wpływ na ukształtowanie terenu GZW miało niewątpliwie górnictwo węglowe, wywołujące obniżenia dochodzące nawet do 30 m. Eksploatację podziemną prowadzono bardzo intensywnie w latach 1940–1990, czego skutkiem są występujące nawet wiele lat po zakończeniu eksploatacji obniżenia terenu.

Należy zauważyć, że granice obszarów górniczych poszczególnych kopalń są poprowadzone z grubsza wzdłuż głównych uskoku występujących w utworach karbonu produktywnego. Ponadto eksploatacja jest prowadzona w miejscach najbardziej opłacalnych, czyli tam, gdzie pokłady są najgrubsze, a przebieg ścian eksploatacyjnych projektuje się zgodnie z budową geologiczną, uwzględniając miąższości węgla, upady i przebieg uskoku. Wszystko to sprawia, że przestrzenny obraz obniżenia występujących na powierzchni siłą rzeczy musi nawiązywać do budowy geologicznej. Niemniej jednak pytanie, czy obserwowane deformacje są spowodowane tylko bezpośrednimi i pośrednimi wpływami eksploatacji, pozostaje otwarte.

Przestrzenny rozkład PS na tle uskoku i wychodni utworów karbonu produktywnego przedstawia figura 1.

1. Uskok kłodnicki o przebiegu równoleżnikowym, stanowiący ważną strukturę regionalną, podkreślony jest wyraźnie punktami PS wskazującymi na obniżenie. Koncentrują się one zwłaszcza w dwóch jego odcinkach: zachodnim

w rejonie Rudy Śląskiej (kopalnia Halemba) oraz wschodnim w rejonie Lgoty. Co ciekawe, punkty wskazujące na obniżenie koncentrują się przede wszystkim w obrębie południowego zrzuconego skrzydła uskoku (w którym występują utwory triasowe). Uskok ten ma genezę waryscyjską i został odmłodzony w czasie ruchów alpejskich. Może on świadczyć o istnieniu współczesnych ruchów tektonicznych w obrębie omawianej strefy, co jednak powinno być w przyszłości zweryfikowane danymi o eksploatacji podziemnej.

2. Bardzo wyraźna koncentracja ujemnych PS zaznacza się w rejonie KWK Murcki. Rozmieszczenie PS przybiera formę klina ograniczonego liniami uskoku: kłodnickiego (od północy), Wojciech (od wschodu) oraz nienazwanego (od zachodu).

3. Inną ważną strefę odzwierciedloną wyraźnie przez PS wskazującą na obniżenie jest regionalny uskok będziński. Jest interesujące, że rozkład PS sugeruje przedłużenie strefy uskoku zarazem w kierunku NW po okolice Piekar Śląskich oraz SE w rejon Ostrów Górniczych. W tym przypadku, co jest rzeczą zaskakującą, większość PS jest zlokalizowana po północnej (wizującej) stronie skrzydła uskoku. Strefa ta charakteryzuje się jednak spadkami terenu, co może mieć również związek z jego spełzywaniem. Uskok będziński ma podobną genezę jak uskok kłodnicki. Można więc założyć, że i w tym przypadku ujemne PS wskazują na przejaw współczesnej tektoniki.

4. Ujemne PS występują także w obrębie struktury synklinalnej w rejonie Bytomia, w serii mułowcowej (górnego warstwy karwińskie).

5. Niezwykle wyraźnie zaznacza się regionalna granica (przebiegająca na wielokilometrowym odcinku między Rudą Śląską a Mysłowicami) między wychodniami spągu serii mułowcowej (górnego warstwy karwińskich) a górnośląską serią piaskowcową (dolnych warstwy karwińskich). Przeważająca liczba ujemnych PS występuje po stronie górnośląskiej serii piaskowcowych. Odzwierciedlenie tej regionalnej granicy w przestrzennym rozmieszczeniu PS może również świadczyć o przejawach w jej obrębie zjawisk i procesów tektonicznych, a równie dobrze odzwierciedlać sposób prowadzonej w latach poprzednich eksploatacji podziemnej. Pełna interpretacja wymaga przeprowadzenia szczegółowej analizy map eksploatacji podziemnej, wierceń i przekrojów geologicznych oraz badań geofizycznych.

6. W sposób wyraźny zaznacza się również inna regionalna granica (przebiegająca pomiędzy Bytomiem, Piekarami Śląskimi i Czeladzią) między wychodniami spągu górnośląskiej serii piaskowcowej a serią paraliczną (warstwy ostrawskie). W tym przypadku obszary występowania utworów górnośląskiej serii piaskowcowej cechuje przewaga PS ujemnych, natomiast w obrębie serii paralicznej dominują zdecydowanie PS dodatnie. Biorąc powyższe pod uwagę jak również spostrzeżenia z punktu poprzedniego, można zaryzykować twierdzenie, że obszary występowania górnośląskiej serii piaskowcowych między Zabrzem, Bytomiem, Będzinem i Chorzowem podlegają w znacznej mierze osia-



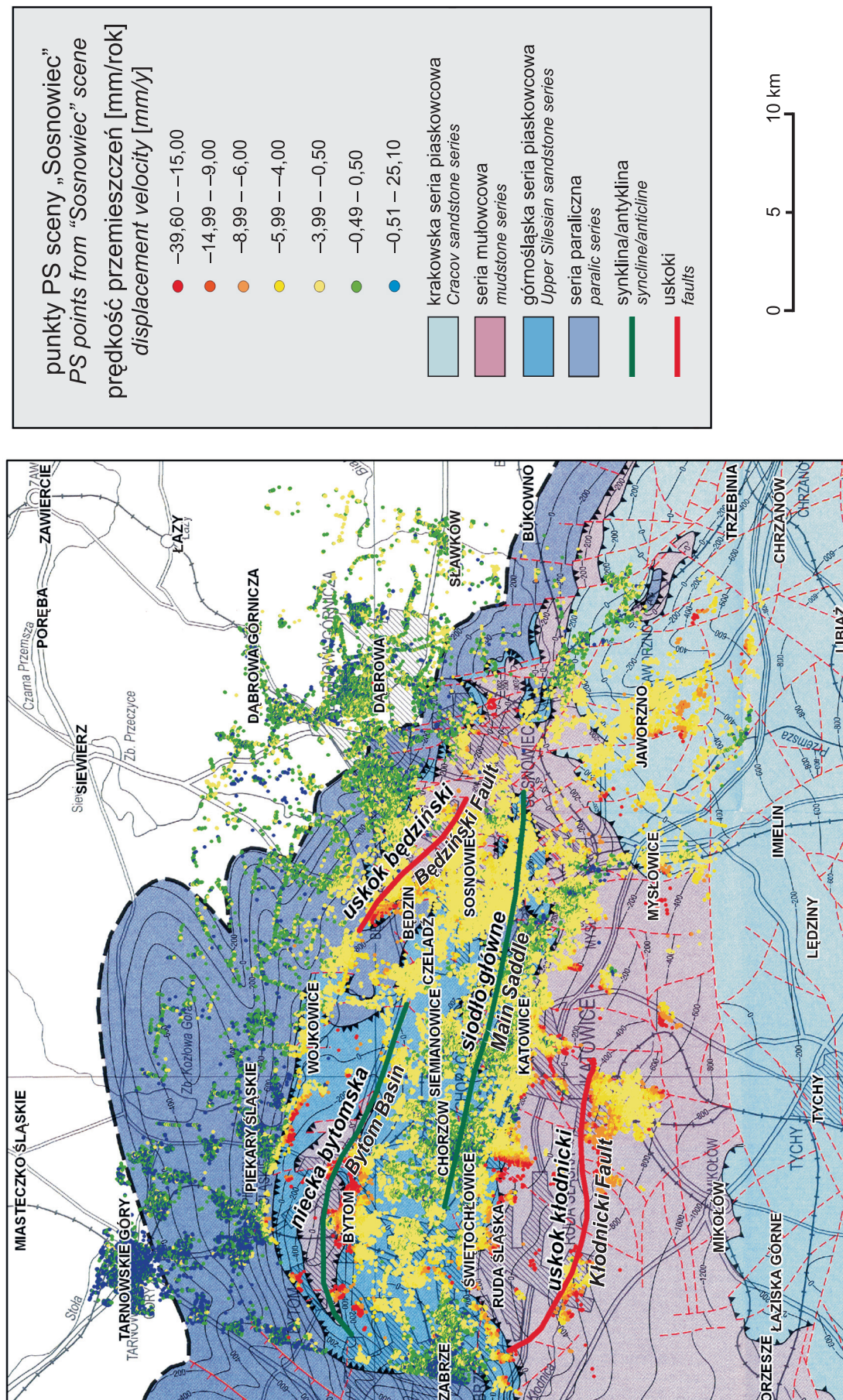


Fig. 1. Przestrzenny rozkład punktów PS sceny „Sosnowiec” na tle uskoków i wychodni utworów karbonu produktywnego

Spatial distribution of the PS points from “Sosnowiec” scene on the background of faults and outcrops of Carboniferous coal-bearing deposits



daniu. Należy zaznaczyć, że oba obszary podlegały intensywnej eksploatacji górniczej.

7. Poza granicami GZW, na północ od Dąbrowy Górniczej oraz Strzemieszyc występują PS zarówno dodatnie, jak i ujemne. Z kolei w rejonie Tarnowskich Gór mamy do czynienia ze zdecydowaną przewagą ruchów wznoszących. Nie jest jasne czy ruchy te mają związek z procesami wynikłymi na krawędzi GZW (odciążenie?), czy też są związane ze starą eksploatacją górniczą złóż cynku, ołowiu i żelaza oraz zmianami warunków hydrogeologicznych. Rozwiązanie tej kwestii wymaga przeprowadzenia odrębnych badań.

8. W różnych częściach GZW stwierdzono również liczne korelacje między liniami uskokowymi a ujemnymi PS. Dotyczą one m.in. uskoku Arkona (odnoga uskoku kłodnickiego), uskoków Kąty–Byczyna, cieszkowskiego i paryskiego w rejonie Jaworzna, uskoku Saary w rejonie Rudy Śląskiej i Chorzowa, myślowickiego i szeregu innych.

Eksploatacja pokładów węgla kamiennego, prowadzona w GZW od przeszło 200 lat, stworzyła skomplikowany stan naprężenia i deformacji, który jest przyczyną powstawania zjawisk dynamicznych objawiających się w postaci wstrząsów górotworu. Obserwacje sejsmologiczne systematycznie prowadzone są tu od około 60 lat. Aktualnie Główny Instytut Górnictwa prowadzi i opracowuje bank „silnych wstrząsów górniczych” na podstawie danych nadsyłanych przez Górnośląską Regionalną Sieć Sejsmologiczną (GRSS) oraz kopalnie sieci sejsmologiczne (KSS).

Poziom rejestrowanej intensywności sejsmiczności indukowanej jest bardzo zróżnicowany i waha się od słabych wstrząsów niewyczuwalnych przez ludzi do silnych wstrząsów o charakterze słabych trzęsień ziemi, powodujących straty materialne.

Dotychczasowe badania rozkładów czasowo-energetycznych oraz mechanizmów ognisk trzęsień wskazują na występowanie dwóch rodzajów wstrząsów charakteryzujących się różnymi mechanizmami (Pilecka, 2006). Pierwsze z nich występują w bezpośrednim sąsiedztwie wyrobisk górniczych i są ściśle związane ze stanem naprężenia i deformacji wynikającym z naruszenia górotworu wskutek prac górniczych. Zazwyczaj są to wstrząsy słabsze, występujące w bliskim sąsiedztwie frontu robót górniczych. Drugie wiążą się z nałożeniem się dwóch czynników: górniczego i tektonicznego. Są to wstrząsy wysokoenergetyczne, występujące w większych odległościach od frontu prac górniczych. Mogą też występować w sąsiedztwie różnych form tektonicznych lub na terenach złóż częściowo wyeksploatowanych. Na ogół są one groźniejsze.

W tej grupie wstrząsów dominuje mechanizm poślizgowy normalny, w niektórych przypadkach z zaznaczającym się poziomem przemieszczenia w ognisku wstrząsu. Zdarza się również, że azymuty płaszczyzn rozrywu i ich upady korelują się z rozciągłością i upadem uskoków.

Dobrym przykładem korelacji mechanizmu ognisk wstrząsów z kierunkiem rozciągłości uskoku kłodnickiego i uskoków towarzyszących są badania prowadzone w kopalni Halemba (Dubieński, Stec, 2001). Analiza objęła grupę zjawisk sejsmicznych o energii  $E > 10^6$  z okresu 1999–2000.

W wyniku analizy wyróżniono trzy grupy wstrząsów związanych z uskokami, w tym jedna z nich była zgodna z rozciągłością uskoku kłodnickiego (E–W).

Lasocki i Idziak (1998) analizowali z kolei kierunkowe relacje między ogniskami kolejnych zjawisk sejsmicznych. Stwierdzili zależności kierunkowe wstrząsów zarówno występujących w tym samym skupisku, jak również w przypadku przynależności do różnych skupisk. Takie zależności przestrzenno-czasowe silnych wstrząsów wspomniani autorzy tłumaczą jako efekt procesów dynamicznych zachodzących na skalę regionalną.

Jura (1995, 1999) podjął próbę odtworzenia pola naprężeń wzdłuż „młodych uskoków” na podstawie metod strukturalno-geomorfologicznych oraz szczegółowego badania wstrząsów górotworu w sąsiedztwie stref uskokowych. Za główne współczesne struktury sejsmogeniczne uznał on dwie hipotetyczne nieciągłości brzeżne, przebiegające równoleżnikowo wzdłuż strefy granicznej między segmentami masywu górnośląskiego – blokami Bytomia i centralnym. Na północy jest to nieciągłość pod osią synkliny Bytomia, a na południu nieciągłość w rejonie uskoku kłodnickiego. Według przywołanych badań, w północnej części uskoku kłodnickiego mają występować młodopalpejskie naprężenia tektoniczne, które mają wpływ na charakter indukowanych przez eksploatację górniczą wstrząsów górotworu. Mechanizm ognisk silnych wstrząsów typu poślizgu pionowego po rozciągłości, zgodnej z rozciągłością uskoku kłodnickiego, wskazuje – według Jury (*op. cit.*) – że wpływ na powstanie tych wstrząsów ma relaksacja naturalnych, resztkowych naprężeń tektonicznych nagromadzonych w tej strefie.

Jak wynika z przedstawionych danych, wstrząsy sejsmiczne na badanym obszarze grupują się w trzech miejscach: na północ od uskoku kłodnickiego, na północ od osi niecki bytomskiej oraz w południowo-wschodnim odcinku uskoku będzińskiego. Jedynie w strefie uskoku będzińskiego są one związane z ujemnymi PS. W dwóch pozostałych przypadkach występują dokładnie między strefami PS o ruchach ujemnych. Trudno jednoznacznie wyjaśnić przyczyny tego stanu rzeczy, jednakże dotychczas na terenie GZW nie notowano gwałtownych przyrostów osiadania terenu w związku ze wstrząsami górniczymi.

Analiza danych PSI ma istotne znaczenie dla wytypowania newralgicznych miejsc lub stref dla przeprowadzenia badań szczegółowych za pomocą innych metod. Miejsca takie, wskazujące na podwyższoną mobilność podłoża, powinny być bezwzględnie brane pod uwagę w trakcie prowadzenia działalności górniczej oraz przy opracowywaniu planów zagospodarowania przestrzennego. Terenami, które powinny być objęte badaniami w pierwszej kolejności, są: rejon KWK Halemba, przyległy do uskoku kłodnickiego, rejon KWK Murcki, wyznaczony liniami uskoków: kłodnickiego (od północy), Wojciech (od wschodu) oraz nienazwanego (od zachodu) w formie klina, strefy uskokowe w rejonie KWK Sobieski–Jaworzno III oraz cała strefa uskoku będzińskiego.

Jak widać na przykładzie GZW, technika PSI dostarcza bardzo ważnych danych, niezbędnych nie tylko w przewidy-

waniu zagrożeń związanych z deformacjami terenu, ale również istotnych w procesie badania współczesnej aktywności tektonicznej. W celu zwiększenia bezpieczeństwa obszarów górniczych optymalnym rozwiązaniem może być integracja danych PSI z danymi DifsAR, GPS, a także danymi innego typu, jak mapy aktywności sejsmicznej lub mapy lineamentów. Połączenie tych danych pozwoli na dokładniejsze poznanie charakteru deformacji występujących w rejonie badań. Technika PSI to niewątpliwie bardzo istotne źródło informacji do monitoringu terenów niestabilnych. Badania, omówione w niniejszym opracowaniu, wskazują na ogromną użyteczność metod DifsAR i PSI. Dla obszaru GZW wykonano dotychczas szereg opracowań, które potwierdzają użyteczność tych metod (Krawczyk i in., 2007; Perski i in., 2007). Wdrożenie ich na stałe, w sposób zintegrowany jako techniki pomiarowej, w badaniu niewielkich, permanentnych przemieszczeń terenu może mieć kluczowe znaczenie w zwiększeniu bezpieczeństwa obszarów, na których takie ruchy występują.

Należy jednak pamiętać, że pomimo wielu bardzo ważnych spostrzeżeń dotyczących korelacji PSI z elementami geologii, rzeźby, użytkowania terenu, działalności górniczej itp., w wielu przypadkach analiza przyniosła wyniki niejednoznaczne, np. szczegółowa analiza aglomeracji sosnowieckiej. Badania metodyczne, podobnie jak w innych krajach europejskich, powinny być więc kontynuowane również na innych obszarach Polski o odmiennych warunkach geologicznych i zagospodarowania.

Na obszarze GZW wykorzystano także dane z satelity ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*). ALOS, nazywany również „Daichi”, był japońskim satelitą umieszczonym na orbicie 24 stycznia 2006 r. Jednym z jego systemów obrazujących powierzchnię Ziemi był system PALSAR (*Phased Array type L-band Aperture Radar*) umożliwiający zobrazowanie w zakresie aktywnych mikrofal (radar). Jak powszechnie wiadomo, systemy radarowe umożliwiają pozyskanie informacji niezależnie od warunków pogodowych oraz pory doby. Ponadto system PALSAR umożliwia pozyskanie wyników dla szeregu wariantów zdolności rozdzielczej (od 10 do 100 m) oraz polaryzacji (poziomej i pionowej).

Podstawową cechą odróżniającą satelitę ALOS-PALSAR od satelitów ERS i ENVISAT jest większa częstotliwość L-band (1,27 GHz), odpowiadająca długości fali 25 cm, w stosunku do C-band, który odpowiada długości fali 5,6 cm. Różnica ta ma podstawowe znaczenie przy określaniu różnic przemieszczeń terenu metodą interferometryczną, co będzie omówione w dalszej części artykułu.

Dane z satelity ALOS zostały wykorzystane w technice DifsAR, różniącej się od omówionej wcześniej techniki PSI. Bazuje ona na rejestracji wzajemnego przesunięcia fazy sygnałów radarowych na dwóch kolejnych scenach. Obraz przedstawiający różnice faz odbitych sygnałów pomiędzy

dwiema scenami nazywany jest obrazem interferometrycznym lub radarogramem. Różnica faz o  $360^\circ$  (pełny cykl) odpowiada połowie długości fali. W technice DifsAR niezbędne są przynajmniej dwa radarogramy wykonane w różnym czasie przedstawiające ten sam obszar. Ich złożenie pozwala na wykonanie obrazu interferencyjnego ilustrującego zmiany wysokości powierzchni terenu, jakie powstały w okresie pomiędzy oboma radarogramami (Perski, 1999; Mirek, Isakow, 2009).

Dane z południowej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego przetworzone przez *Gamma Remote Sensing* ze Szwajcarii zawierają pięć interferogramów różnicowych przedstawiających różnice wysokości w okresach: 22.02.2007–10.07.2007; 10.07.2007–25.08.2007; 25.08.2007–25.11.2007; 25.11.2007–25.02.2008; 25.02.2008–27.05.2008. Różnica czasowa dwóch zobrazowań omawianych w niniejszym artykule wynosiła 46 dni. Można więc powiedzieć, że prezentowany materiał przedstawia aktualny stan dynamiki powierzchni na Górnym Śląsku.

Dotychczasowe doświadczenia wykazały, że za pomocą interferogramów różnicowych można rejestrować osiadania powodowane wydobywaniem węgla kamiennego. Jednakże dane interferometryczne z pasma C stosowanego głównie do tej pory (satelity ERS-1 i ERS-2 czy ENVISAT) umożliwiły śledzenie deformacji w skali od milimetrów do kilkunastu centymetrów.

Analizując bazę danych ALOS, z łatwością można zauważyć charakterystyczne owalne prążki interferometryczne (*fringes*) różniące się wielkością i ilością pierścieni. Wskazują one na przemieszczenia, które w skrajnych przypadkach sięgają 30 cm w ciągu 46 dni (Czarnogórska i in., 2009a, b). Prążki występują przede wszystkim na obszarach kopalń węgla kamiennego, tam gdzie prowadzona jest bieżąca eksploatacja (fig. 2). Niezwykle interesująco wygląda również porównanie danych interferometrycznych z danymi przewidywanych osiadań zawartymi w atlasie geologiczno-inżynierskim aglomeracji katowickiej (Frankowski, 2005). Widać wyraźnie, że w znacznym stopniu izolines przewidywanych osiadań oraz prążki interferometryczne są ze sobą zbieżne (fig. 2). Trzeba pamiętać, że pokazują one jedynie chwilowy obraz dynamiki deformacji nad aktywnymi frontami eksploatacji. Analiza danych powinna być kontynuowana w skali szczegółowej w ścisłym porozumieniu z przedstawicielami kopalń, spółek węglowych oraz władzami samorządowymi.

Na obecnym etapie badań można jednak stwierdzić, że dane ALOS (zakończenie misji 21 maja 2011 r.) były doskonałym uzupełnieniem informacji górniczo-geodezyjnych na temat przemieszczeń terenu. W przyszłości dla detekcji osiadań na terenach górniczych, takich jak GZW oraz LGZM, należy wykorzystywać dane radarowe z zakresu L-band (~23 cm) oraz – jeśli to będzie możliwe – P-band (~65 cm). Promieniowanie elektromagnetyczne z tego zakresu ma znacznie większe możliwości penetracji przez roślinność.







## POŁUDNIOWE WYBRZEŻE BAŁTYKU W REJONIE ZATOKI GDAŃSKIEJ

Wzmożenie erozji wybrzeży Zatoki Gdańskiej powodowane jest przyspieszonym wzrostem poziomu morza oraz częstości i siły sztormów. Na wzrost poziomu morza poza zmianami klimatycznymi mogą mieć wpływ pionowe ruchy skorupy ziemskiej. Dotychczasowe analizy ruchów pionowych powierzchni Ziemi przeprowadzane w skali kraju nie dostarczyły jednoznacznych i spójnych informacji o ich przestrzennym zróżnicowaniu i zakresie (Liszkowski, 1982; Wyrzykowski, 1985; Kowalczyk, 2006a, b).

W kontekście pomiarów niwelacji precyzyjnej, zachodnia część Zatoki Gdańskiej, położona na północ od Gdańska, wydaje się tektonicznie stabilna, a współczesne pionowe ruchy skorupy ziemskiej oscylują wokół 0. Z kolei południowa część zatoki, rozpościerająca się na wschód od Gdańska, osiada 2 mm/rok (Wyrzykowski, 1985; Kowalczyk, 2006a, b). W zasadzie nie ma bezpośrednich dowodów geologicznych na istnienie tak szybkich osiadań w rejonie Gdańska (Liszkowski, 1982). Wstępne analizy danych paleogeograficznych wskazują jednak, że w południowo-wschodniej części zatoki przez ostatnich 5000 lat miało i ma miejsce osiadanie rzędu 0,1 mm/rok w stosunku do części północno-zachodniej. Dane z zapisów mareografów wskazują również szybszy o 0,1 mm/rok wzrost poziomu morza w części południowo-wschodniej. W rejonie Gdańska na osiadanie, poza czynnikami natury geotektonicznej, może mieć wpływ zwiększone wydobycie wód podziemnych. Rozpoznanie charakteru ruchów obniżających ma w tym rejonie kluczowe znaczenie, z uwagi na intensywne zagospodarowanie wybrzeża Zatoki Gdańskiej oraz możliwość zagrożenia powodziowego. W czasach historycznych zanotowano w rejonie Gdańska przypadki powodzi i katastrofalnych sztormów, w wyniku których niszczone była infrastruktura miejska i portowa. W czasie ostatniej wielkiej powodzi w roku 1826 duża część nie tylko Żuław Wiślanych, ale również Gdańska znalazła się pod wodą. Podobnych wydarzeń można się spodziewać również współcześnie, biorąc pod uwagę stały wzrost poziomu morza. Dlatego też omawiany obszar został poddany analizie satelitarnych danych interferometrycznych PSI, z uwagi na możliwość prześledzenia przemieszczeń powierzchni na dużym obszarze.

Powierzchnia badanego obszaru wynosi kilkaset kilometrów kwadratowych i rozciąga się wzdłuż południowo-zachodnich wybrzeży Zatoki Gdańskiej. Na zachodzie sięga po wysoczyznę morenową, natomiast na wschodzie po ujście Wisły w rejonie Świbna (fig. 3). Większość badanego obszaru stanowią płaskie tereny delty Wisły. Na tym płaskim obszarze znajdują się elewacje z reguły nie przekraczające 2,5 m n.p.m. Występują tu również tereny depresyjne do około 2 m p.p.m. Wysoczyzna morenowa, położona w zachodniej części badanego obszaru, wznosi się do około 40–140 m n.p.m. Krawędzie wysoczyzny poprzecinane są systemem szerokich dolin.

Powierzchnia terenu pokryta jest utworami holoceniowymi i plejstoceniowymi (Mojski, 1979). Osady holoceniowe dominują na płaskich terenach delty Wisły. Są to przede wszystkim

muły, torfy oraz piaski rzeczne o miąższościach około 20–30 m. Na kontakcie delty Wisły z Bałtykiem występują różnowiekowe ciągi wydymowe wznoszące się lokalnie do 10–20 m n.p.m. Wysoczyzna morenowa zbudowana jest głównie z glin, ilów oraz piasków fluwioglacjalnych wieku plejstoceniowego. Miąższość ich nie przekracza 200 m. Na obszarze Gdańska występują również osady antropogeniczne. Ocenia się, że od średniowiecza powierzchnia terenu podniosła się o około 3 m.

Dane radarowe były przetwarzane za pomocą programu SPINUA (*Stable Point Interferometry over Unurbanized Areas*), który jest jednym z szeregu programów służących do przetwarzania i analizy PSI (Bovenga i in., 2004). Program ten charakteryzuje się wieloetapowym podejściem na etapie rejestracji obrazów radarowych wykonanych w różnym czasie. Interferogramy dyferencyjne są generowane przy wykorzystaniu zewnętrznego, cyfrowego modelu terenu SRTM o rozdzielczości przestrzennej  $90 \times 90$  m<sup>2</sup>. Ponadto program SPINUA wyróżnia przetwarzanie niewielkich fragmentów obrazów radarowych, obejmujących zazwyczaj powierzchnię kilku kilometrów kwadratowych. Umożliwia to w dalszej kolejności optymalizację zagęszczenia i identyfikację potencjalnych obszarów deformacji terenu. Ponadto niewielki rozmiar opracowywanych obszarów umożliwia lokalne zastosowanie liniowej aproksymacji sygnału fazy atmosferycznej, co z kolei zapewnia większą dokładność przetwarzania. Wybrane niewielkie fragmenty obrazów częściowo zachodzą na siebie tak, aby uzyskać jednorodne wyrównanie referencyjne, co jest istotne dla otrzymania poprawnej mapy deformacji. Zbiór analizowanych danych obejmował zestaw 41 obrazów satelitarnych ERS-1 i ERS-2 (w tzw. wariancie „schodzącym”), zarejestrowanych w okresie 1995–2001 (fig. 3). Jako obraz referencyjny wyznaczono scenę z 22 maja 1997 r.

Dane satelitarne ERS SAR zostały dostarczone przez ESA w ramach projektu CAT-1 nr 4416 i przetworzone przez specjalistów z CNR-ISSIA we Włoszech.

Najogólniej można stwierdzić, że na badanym obszarze znaczna większość PS nie wskazuje na występowanie przemieszczeń. Co więcej, centra głównych aglomeracji miejskich: Gdańska, Gdyni czy Sopotu charakteryzują się stabilnością gruntów. Natomiast na wschodnich oraz zachodnich peryferiach Gdańska zaznaczyły się wyraźnie PS o wartościach ujemnych. Ponadto dwa wyraźne skupienia ujemnych PS zanotowano na zachód od Gdańska oraz Sopotu. Pierwsze z nich zostały zlokalizowane na terenie gdańskiego lotniska, natomiast drugie na obszarze nowej infrastruktury budowlanej. Oba obszary cechuje płaska, mało zróżnicowana topografia oraz występowanie osadów gliniastych i ilastych. Najprawdopodobniej zaobserwowane osiadanie terenu jest związane z kompaktacją gruntów powstałą wskutek obciążenia nową zabudową. Inną możliwą przyczyną obserwowanego zjawiska mogą być błędy w przetwarzaniu danych: obszary te znajdują się w pewnym oddaleniu od aglomeracji i są od niej oddzielone kompleksem leśnym. Słabe połącze-



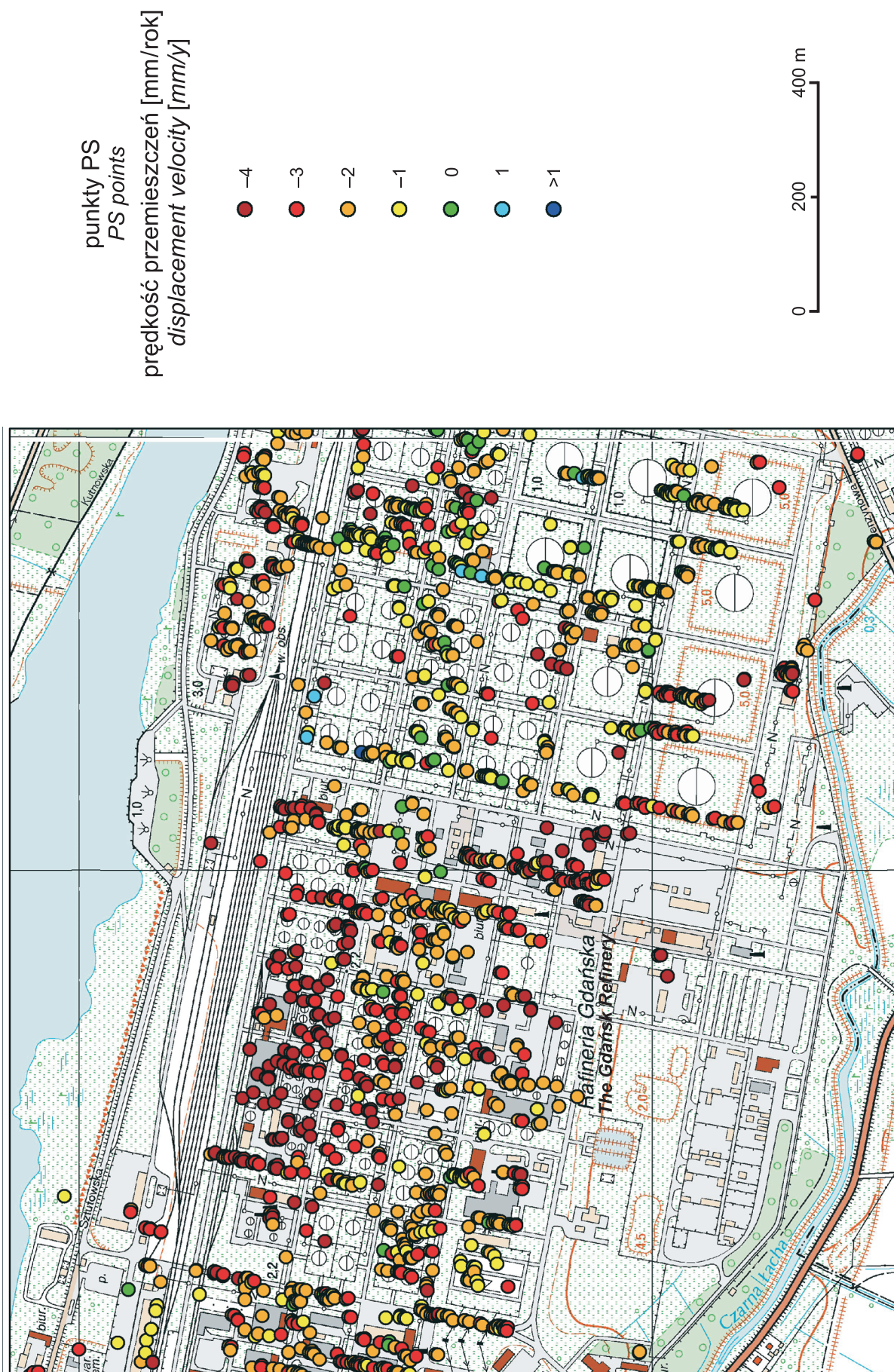


Fig. 3. Punkty PS na obszarze rafinerii gdańskiej na tle mapy topograficznej  
PS points in the Gdansk Refinery in the background of topographic map

nie między obszarami (brak PS pomiędzy) powoduje, że tereny te są brane pod uwagę w obliczeniach jako oddzielne „klastry”, które trudno ze sobą połączyć. Dla weryfikacji dla obszaru tego należy przeprowadzić obliczenia przy użyciu innych parametrów lub innych algorytmów.

Badanie interferometryczne jest często niezwykle przydatne dla oceny przemieszczeń w skali szczegółowej. Bardziej wnikliwa analiza danych dla starego centrum Gdańska uwidacznia, że oprócz licznych punktów wskazujących na stabilność podłoża (co sygnalizowano uprzednio) znajdują się pojedyncze PS sugerujące proces osiadania, co może być związane z występowaniem gruntów słabonośnych lub też niestabilnością poszczególnych obiektów. W takich przypadkach wskazana jest wizja lokalna i sięgnięcie – o ile to możliwe – po wyniki innych pomiarów geodezyjnych, np. precyzyjnej niwelacji. Ciekawe spostrzeżenia odnotowano w przypadku mostu Siennickiego nad Martwą Wisłą znajdującego się we wschodniej części miasta. O ile zasadnicza część mostu jest stabilna, to filary mostowe charakteryzują się niestabilnymi PS, z wyraźną tendencją do obniżania. Jest to zasadniczo zgodne z geotechnicznego punktu widzenia, ponieważ z reguły filary mostowe w pierwszej kolejności są zagrożone niestabilnością podłoża. Również i w tym przypadku analiza interferometryczna wskazuje na konieczność wykonania wizji terenowej i podjęcia szczegółowych badań. Wiele wskazuje bowiem, iż PS zlokalizowane są na słupach latarni, które mogą podlegać deformacjom niezależnie od podłoża. Ta ciekawa obserwacja uwidacznia z jak dużą czułością w wykrywaniu deformacji mamy do czynienia w przypadku technik PSI.

Innym bardzo interesującym obszarem wyróżnionym w trakcie analizy interferometrycznej jest teren rafinerii gdańskiej. W rejonie tym zaznacza się niezwykle wyraźnie duże skupienie PS o wartościach ujemnych (fig. 3). Odnotowano tu największe wartości ujemne w całym badanym obszarze, sięgające  $-12$  mm/rok. Na terenie rafinerii oprócz ujemnych PS są również inne, niewskazujące na obecność przemieszczeń. Najprawdopodobniej zaistniałe procesy wynikają z przyczyn geomorfologicznych – lokalizacji obiektu w obrębie starych, naturalnych koryt Wisły na terenie jej delty – oraz geologicznych – występowania rzecznych osadów aluwialnych, mułów oraz materiału organicznego, w tym torfów. Obserwowany efekt powstał zatem zapewne w wyniku zróżnicowanej kompaktacji osadów pod wpływem ciężaru infrastruktury budowlanej rafinerii. Niemal identyczne wyniki jak dla aglomeracji gdańskiej oraz obszaru rafinerii otrzymano w wyniku przetwarzania innej serii danych ERS-1 i ERS-2 zarejestrowanych z sąsiedniej ścieżki

satelitarnej (Perski, Mróz, 2008). Warto również zaznaczyć, że budowę rafinerii zapoczątkowano w latach 70. Proces ten jest więc długotrwały, jakkolwiek należy wziąć pod uwagę znaczną miąższość osadów słabonośnych (30–40 m) oraz znaczny ciężar konstrukcji. Podobną sytuację zaobserwowano w trakcie analizy PSI aglomeracji Rzymu. W południowej części tego miasta na terenach zabudowy w obrębie osadów aluwialnych Tybru odnotowano wyraźne osiadanie, niezależnie od faktu, że zabudowa została zapoczątkowana jeszcze w latach czterdziestych, bezpośrednio po zakończeniu II wojny światowej (Wasowski, Ferretti, 2007).

Innym obszarem skupienia PS wskazujących na przemieszczenia jest rejon ujścia Wisły w okolicy Świbna. Zarejestrowane tu PS odzwierciedlają sygnały odebrane od pojedynczych domów bądź innych związanych z nimi obiektów. Obecność stabilnych i niestabilnych PS sugeruje również i tutaj zróżnicowane osiadanie w skali lokalnej. Z całą pewnością jest to związane ze specyfiką tego miejsca i zróżnicowaniem litologii oraz wahaniem zwierciadła wód gruntowych.

Wyniki analizy PSI nie potwierdziły jednoznacznie spójnego i regularnego obrazu przemieszczeń wzdłuż południowo-zachodnich wybrzeży Zatoki Gdańskiej. Jest bardzo prawdopodobne, że ruchy skorupy ziemskiej w tym rejonie nie przekraczają  $\pm 2$  mm/rok, co utrudnia lub wręcz uniemożliwia jednoznaczną interpretację PS. Jest bezspornie oczywiste, że badania i pomiary terenowe są niezbędne dla właściwej oceny stwierdzonych przemieszczeń. Wszystko wskazuje jednak na to, że przemieszczenia są związane ze zróżnicowanym osiadaniem budynków oraz infrastruktury inżynierskiej powstałym wskutek kompresji gruntów. Najwyższe wartości osiadań  $-12$  mm/rok zarejestrowano na terenie rafinerii gdańskiej, zbudowanej na aluwialnych osadach delty Wisły.

Ważną obserwacją stanowi również fakt, że przeważającą część aglomeracji Gdańska, Gdyni i Sopotu jest stabilna.

W ostatnich pięciu latach pojawiły się nowe systemy satelitarne zawierające systemy SAR. Rozwój tych systemów idzie obecnie w kierunku wysokiej rozdzielczości i polarymetrii. W chwili obecnej dostępne są dwa wysokorozdzielcze systemy komercyjne pracujące w paśmie X: dwa satelity niemieckie TerraSAR-X/Tandem-X oraz włoska konstelacja 4 satelitów COSMO-SkyMED. Oba te systemy są wykorzystywane w badaniach interferometrycznych. Pierwsze opracowania interferogramów TerraSAR-X i ich porównanie z danymi otrzymywanymi w paśmie C (ENVISAT) wykazały ich wielką przydatność dla badań terenów górniczych (Krawczyk i in., 2008)

## LITERATURA

BOVENGA F., REFICE A., NUTRICATO R., GUERRIERO L., CHIARADIA M.T., 2004 — SPINUA: a flexible processing chain for ERS/ENVISAT long term interferometry. Proceedings of ESA-ENVISAT Symposium, Salzburg, Austria, 6–10 September.

CZARNOGÓRSKA M., GRANICZNY M., KOWALSKI Z., WEGMULLER U., 2009a — Using ALOS PALSAR, Envisat ASAR and ERS data for monitoring of subsidence and related ground failures in Upper Silesian Coal Basin, Southern Poland. EGU (European Geosciences Union) General Assembly 2009,



- Vienna, Austria, 19–24 April 2009. *Geophys. Res. Abstracts*, **11**.
- CZARNOGÓRSKA M., GRANICZNY M., UŚCINOWICZ S., NUTRICATO R., TRIGGIANI S., NITTI D.O., BOVENGA F., WASOWSKI J., 2009b — PSI analysis of ground deformations along the south-western coast of the gulf of Gdansk (Poland). Proceedings of the Workshop Fringe 2009, 30 November – 4 December 2009, Frascati, Italy. ESA SP-677, March 2010.
- DUBIŃSKI J., STEC K., 2001 — Relationship between focal mechanism parameters of mine tremors and local strata tectonics. Dynamic rock mass response to mining. The South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 113–118.
- FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F., 2000 — Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.*, **38**, 5: 2202–2212.
- FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F., 2001 — Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.*, **39**, 1: 8–20.
- FRANKOWSKI Z., 2005 — Atlas geologiczno-inżynierski aglomeracji katowickiej, zrealizowany przez Katowickie Przedsiębiorstwo Geologiczne. Państwowy Instytut Geologiczny, Przedsiębiorstwo Geologiczne we Wrocławiu PROXIMA.
- JURA D., 1995 — Young-Alpine morphotectonics of the Silesian Carpathian Foredeep and the recent geodynamics of the Upper Silesian Coal Basin. *Techn. Posz. Geol. Geosynopt. Geoterm.*, **95**, 3: 13–21.
- JURA D., 1999 — Young-Alpine Kłodnica Fault scarps of the metacarthian in the Silesian Upland. *Techn. Poszuk. Geol. Geosynopt. i Geoterm.*, 1: 52–56.
- KOWALCZYK A., 2006a — Nowa mapa współczesnych pionowych ruchów skorupy ziemskiej na obszarze Polski. Cały kraj się obsuwa. *Geodeta*, **8**: 45–48.
- KOWALCZYK A., 2006b — Wyznaczenie modelu ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski (praca doktorska). UWM, Olsztyn.
- KRAWCZYK A., PERSKI Z., HANSEN R.F., 2007 — Application of ASAR interferometry for motorway deformation monitoring. ESA ENVISAT Symposium, Montreux, Switzerland, 23–27 April 2007.
- KRAWCZYK A., PERSKI Z., MARINKOVIĆ P., HANSEN R., 2008 — Evaluation of TerraSAR-X InSAR for the measurements of mining subsidence. 3-rd TerraSAR-X Science Team Meeting, 25–26 November 2008, Oberpfaffenhofen, Germany.
- LASOCKI S., IDZIAK A.F., 1998 — Dominant directions of epicentre distribution of regional mining induced seismicity series in Upper Silesia Coal Basin. *Pure Appl. Geophys.*, **153**, 1: 21–40.
- LISZKOWSKI J., 1982 — Geneza pola współczesnych pionowych ruchów skorupy ziemskiej na obszarze Polski. *Rozpr. UW*, **174**.
- MIREK K., ISAKOW Z., 2009 — Wstępna analiza danych satelitarnych interferometrii radarowej z południowo-zachodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. *W: Warsztaty 2009 z cyklu: Zagrożenia naturalne w górnictwie. Mat. Symp.*: 228–234.
- MOJSKI J.E., 1979 — Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000, ark. Gdańsk. Inst. Geol., Warszawa.
- PERSKI Z., 1999 — Osiedlenia terenu GZW pod wpływem eksploatacji podziemnej określane za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). *Prz. Geol.*, 2: 171–174.
- PERSKI Z., MRÓZ M., 2008 — Współczesna aktywność geodynamiczna wybrzeża Bałtyku w świetle wyników badań satelitarnej interferometrii radarowej InSAR, PSInSAR. *W: XVI Ogólnopolskie Sympozjum Naukowe „Geoinformacja obrazowa w świetle aktualnych potrzeb”*, Międzyzdroje 15–17 października 2008. Streszczenie. *Arch. Fotogram., Kartogr. Teledet.*, **18**: 509–517.
- PERSKI Z., KETELAAR G., MRÓZ M., 2007 — Interpretacja danych Envisat/ASAR o przemiennej polaryzacji na obszarach zurbanizowanych w kontekście charakterystyki stabilnych rozpraszaczy (persistent scatterers). *Arch. Fotogram. Teledet.*, **16**: 467–482.
- PILECKA E., 2006 — Związek lineamentów z sejsmicznością indukowaną na terenach górniczych Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. IGSMiE PAN, Warszawa.
- WASOWSKI J., FERRETTI A., 2007 — Detecting site instability hazards with SAR interferometry. *W: New Developments and Challenges in Remote Sensing* (eds Z. Oluic, Z. Bochenek): 707–713. Milpress, Rotterdam.
- WYRZYKOWSKI T., 1985 — Map of recent vertical movements of the Earth crust on the territory of Poland 1:2 500 000. Instytut Geodezji i Kartografii, Warszawa.

## SUMMARY

This work discusses some issues concerning the applications of satellite synthetic aperture radar interferometry (InSAR) in the studies of the geodynamics and ground movement of the two selected areas in Poland: the Upper Silesian Coal Basin (USCB) and the Southern Baltic Coast in Gdańsk Bay regions. For the former site, the presented interferometric results were obtained in the context of the collaboration between the PIG – PIB and the consortium Terrafirma (<http://terrafirma.eu.com>). Terrafirma is an ESA GMES project aimed at providing civil protection agencies, disaster management organisms, and coastal, rail and motorway authorities with support in the process of risk assessment and mitigation by using the latest technology to meas-

ure terrain motion from satellite radar data. For the Gdańsk region site, the interferometric results were obtained through the collaboration with the Italian National Research Council (CNR) institutes ISSIA and IRPI and thanks to ERS SAR data provided by the European Space Agency (ESA) within the CAT-1 project no. 4416.

InSAR techniques can be applied to detect and measure ground deformation, provided that the topographic phase contribution is removed from a sufficiently long time span interferogram in which interferometric phase surface displacement is recorded. This involves the generation and subtraction of so-called synthetic interferogram, and leads to Differential SAR interferometry (DInSAR or DifSAR).

It can be done either by exploiting an a priori DEM (two-pass technique) or by using a Tandem or short temporal baseline “topographic” interferogram.

However, as discussed in this work, there are certain requirements for the practical applicability of DInSAR. Particularly, in vegetated areas the technique often fails to produce useful results. The advanced Persistent Scatterers Interferometry (PSI) technique overcomes some of the conventional DInSAR limitations and is capable to provide valuable, high precision (mm-cm) ground surface deformation data. Although the technique represents a fully operational tool, its applicability depends on the availability of a sufficient number of suitable targets. Densely urbanized areas (e.g. large towns and cities) with limited vegetation cover represent ideal settings, but useful results can also be obtained for peri-urban and rural areas.

Regarding the USCB area, the following two interferometric methods were applied: PSI (based on analysis of the

data from the ESA’s satellites ERS-1 and ERS-2) and DInSAR (based on analysis of the data from the Japanese satellite – ALOS). The data interpretation showed clear utility of the radar interferometry results in investigations of mining-induced subsidence. The outcomes of the study also revealed the complementarities of the conventional and PSI applications.

The results of the PSI analysis of the Southern Baltic Coast (Gdańsk Bay area) indicated that, apart from some localized cases of ground instability, the major portion of Gdańsk-Gdynia-Sopot agglomeration is stable or nearly stable. One important exception regards the area of the Gdańsk Refinery, where subsidence rates up to 12 mm/year were revealed.

The presented InSAR application examples demonstrate that the satellite interferometry is extremely useful for ground movement studies in the engineering-geological practice.