

**DETEKCJA PIONOWYCH PRZEMIESZCZEŃ TERENU NA OBSZARACH
GÓRNICZYCH Z WYKORZYSTANIEM SATELITARNEJ INTERFEROMETRII
RADAROWEJ TYPU PSINSAR**

**DETECTION OF THE VERTICAL GROUND DISPLACEMENTS IN MINING
AREAS USING PSINSAR RADAR SATELITE INTERFEROMETRY**

Andrzej Leśniak, Stanisława Porzycka

Katedra Geoinformatyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: PSInSAR, osiadanie terenu, GZW

STRESZCZENIE: Tematem badań przedstawionych w artykule jest detekcja pionowych przemieszczeń terenu w północno-wschodniej części Górnśląskiego zagłębia Węglowego z wykorzystaniem danych satelitarnej interferometrii radarowej w odmianie PSInSAR. Wykorzystano w tym celu wszystkie satelitarne obrazy radarowe zarejestrowane na tym obszarze z pokładów satelitów ESA w latach 1992-2003. Technika PSInSAR pozwala na wykrywanie małych pionowych przemieszczeń pojedynczych punktów odbijających. Technika ta umożliwia rejestrację przemieszczeń rzędu 0.5 mm/rok obiektów o małych wymiarach przestrzennych takich jak dachy budynków, rurociągi, mosty. Tak małe ruchy mogą być wynikiem regionalnych tektonicznych ruchów izostatycznych lub mogą być spowodowane prowadzoną na tym terenie działalnością górnictwem. Analiza osiadań na terenie Zagłębia Dąbrowskiego została wykonana z zastosowaniem metod geostatystycznych. Metody te wykorzystują semiwariogram, który opisuje zróżnicowanie danych w zależności od ich wzajemnej odległości i wzajemnej orientacji przestrzennej. Wynik analizy geostatystycznej danych PSInSAR nie potwierdził zależności pomiędzy tempem osiadań gruntu a prowadzonymi pracami górnictwem. Analiza ta wykazała jednak związek pomiędzy osiadaniami a rozmieszczeniem uskoku na tym obszarze. Największe osiadania zostały wykryte w skrzydłach zrzuconych uskoku i blisko stref przecięć linii uskoku.

1. WSTĘP

Obszary intensywnej, podziemnej eksploatacji górnictwem są szczególnie zagrożone występowaniem różnego rodzaju przemieszczeń terenu. Mogą to być nagłe i duże przemieszczenia, ale również niewielkie, długookresowe osiadania występujące nawet wiele lat po zakończeniu wydobywania kopaliny. Zarówno w pierwszym jak i w drugim przypadku na charakter deformacji ma wpływ wiele czynników, w tym sposób eksploatacji, budowa geologiczna, a także warunki hydrogeologiczne. Dla zapewnienia większego bezpieczeństwa obszarów górnictwem konieczne jest jak najdokładniejsze rozpoznanie mechanizmu występujących tam przemieszczeń i stały ich monitoring. Do detekcji

i obserwacji powolnych, pionowych przemieszczeń terenu, występujących na dużych obszarach, można z powodzeniem wykorzystać technikę PSInSAR (ang. *Permanent Scatterers Interferometry Synthetic Aperture Radar*). Niniejsza praca przedstawia przykład zastosowania tej metody w badaniu osiadania terenu w rejonie północno-wschodniej części GZW.

2. CHARAKTERYSTYKA METODY I DANYCH POMIAROWYCH

Metoda PSInSAR opracowana w latach 90-tych XX wieku polega na przetwarzaniu dużego zestawu obrazów radarowych (zwykle powyżej 30-tu) i obliczaniu dla wybranych punktów obrazu różnic fazowych pomiędzy poszczególnymi sygnałami. Przetwarzane są w ten sposób jedynie te punkty dla których rejestrowane sygnały w długich okresach charakteryzują się stabilną w czasie amplitudą i fazą sygnału, czyli tak zwane punkty PS (ang. *Permanent Scatterers*) (Ferretti et al., 2001). Różnice fazowe rejestrowanych sygnałów radarowych odbitych w tych punktach obrazów dostarczają informacji o powolnych, pionowych przemieszczeniach terenu. Metoda charakteryzuje się bardzo wysoką dokładnością. Umożliwia ona rejestrację względnych przemieszczeń terenu rzędu 1 mm/rok jeśli gęstość punktów PS na obrazie jest większa od 3 na km².

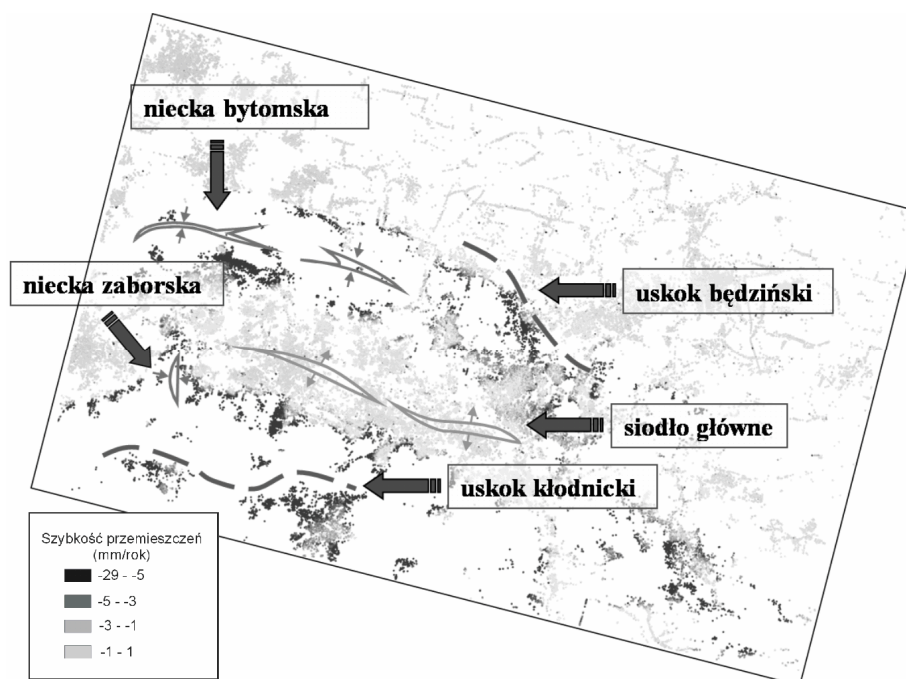
Dane PSInSAR wykorzystane w tej pracy otrzymano w wyniku przetworzenia obrazów radarowych wykonanych z pokładów europejskich satelitów ERS-1, ERS-2 oraz ENVISAT. Dane pochodzą ze zobrażeń wykonanych w latach od 1992 do 2003 i zawierają serię 79 zdjęć radarowych wykonanych dla terenu północno-wschodniej części Górnego Śląska. Obszar badań rozciąga się od Tarnowskich Gór i Zabrze na zachodzie do Dąbrowy Górniczej i Jaworzna na wschodzie.

Górnośląskie Zagłębie Węglowe, to rejon, gdzie od ponad 200 lat prowadzona jest intensywna eksploatacja węgla kamiennego. Teren ten bardzo dobrze nadaje się do badań z wykorzystaniem techniki PSInSAR. Jest to teren zabudowany, na którym znajduje się wiele stabilnych reflektorów radarowych. Na badanym obszarze są to głównie dachy budynków oraz fragmenty rurociągów. W wyniku przetworzenia obrazów radarowych na obszarze badań o powierzchni 1210 km² zostało zidentyfikowanych około 123 000 punktów PS. Maksymalne wartości średniej szybkości przemieszczeń punktów PS, na tym obszarze to 39 mm/rok (osiadanie terenu) i 25 mm/rok (podnoszenia terenu). Dla zdecydowanej większości badanego obszaru charakterystyczne jest osiadanie terenu.

Analizy danych przeprowadzone dla całego obszaru północno-wschodniej części GZW pokazują, że wartości średniej szybkości przemieszczeń punktów PS rozkładają się w sposób regularny. Punkty o zbliżonych wartościach tworzą wydłużone równoleżnikowo strefy z południowo-wschodnim odchyleniem kierunku (patrz Rys. 1). Widoczna jest wyraźna zależność między wartościami przemieszczeń a rozmieszczeniem głównych jednostek tektonicznych. Największym tempem osiadania cechują się skrzydła zrzucone dwóch uskoków: kłodnickiego i będzińskiego, a także struktury synkinalne: niecka zaborska i bytomska. Tereny stabilne odpowiadają obszarom siodła głównego.

Nie stwierdzono natomiast istotnej korelacji pomiędzy szybkością pionowych przemieszczeń terenu a podstawowymi jednostkami geologicznymi. Analizując mapę geologiczną tego obszaru można stwierdzić, że większość punktów PS o największym tempie osiadania zlokalizowanych jest na obszarze górnośląskiej serii piaskowcowej i w serii mułowcowej (w skrzydle zrzuconym uskoku kłodnickiego). Ponadto na obszarze

krakowskiej serii piaskowcowej duże tempo osiadań zostało zarejestrowane w rejonie Jaworzna. Z drugiej strony na obszarze górnośląskiej serii piaskowcowej większość punktów PS wskazuje na małe tempo osiadania lub jego całkowity brak.



Rys. 1. Rozmieszczenie punktów PS oraz szybkości ich przemieszczeń na tle głównych jednostek tektonicznych północno-wschodniej części Górnego Śląska

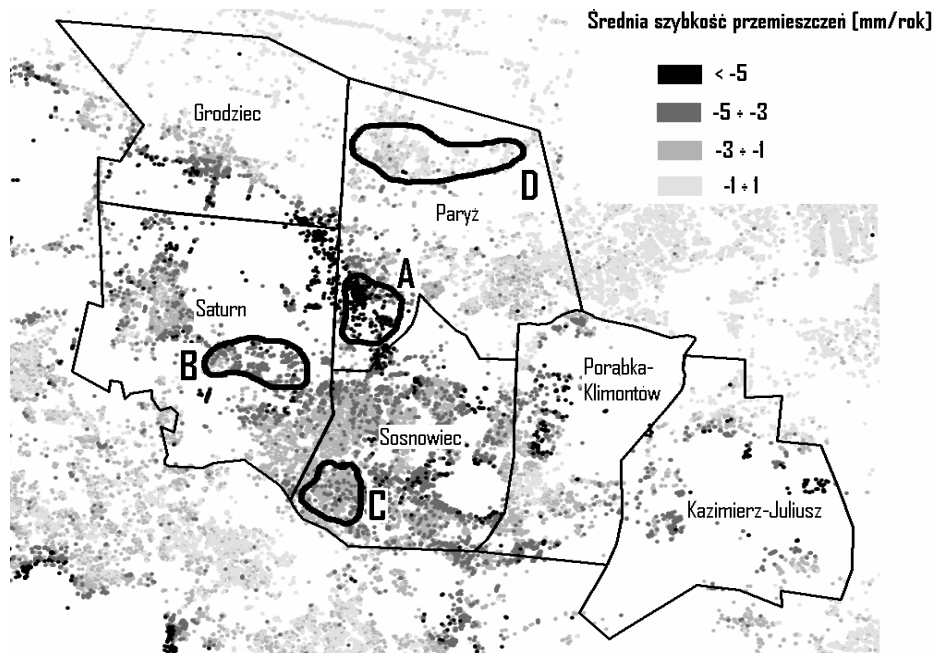
Podobnie brak jest analogii między wartościami przemieszczeń a granicami obszarów górniczych. Punkty PS o dużej szybkości osiadania znajdują się zarówno na obszarach czynnej eksploatacji węgla kamiennego jak i na obszarach, gdzie wydobywanie już zakończono.

3. OPIS OBSZARU BADAŃ SZCZEGÓŁOWYCH

Dotychczas przedstawione analizy danych PSInSAR dotyczyły całego obszaru północno-wschodniej części GZW i nie uwzględniały lokalnej specyfiki określonej kopalni czy też jednostki tektonicznej. Szczegółowa analiza umożliwi prześledzenie powiązań pomiędzy tempem osiadań danego rejonu a jego budową geologiczną i tektoniczną oraz prowadzoną na tym terenie działalnością górniczą. Tego rodzaju analiza osiadań terenu przeprowadzona została dla obszarów górniczych kopalń Sosnowiec, Saturn, Grodziec, Paryż, Porąbka-Klimontów oraz Kazimierz-Juliusz znajdujących się w obrębie Zagłębia Dąbrowskiego (Rys. 2).

Część kopalń tego zagłębia znajduje się w strefie uskoku będzińskiego, w rejonie którego odnotowano znaczące osiadania terenu. Celem prezentowanych tu badań było określenie czynników, które mogły mieć decydujący wpływ na uruchomienie procesu pionowych przemieszczeń powierzchni.

Dla obszaru Zagłębia Dąbrowskiego charakterystyczne jest osiadanie terenu, które największe wartości przyjmuje zarówno na terenie obszaru górniczego czynnej kopalni Kazimierz-Juliusz, jak również w rejonach, gdzie eksploatacja węgla już od kilku lub kilkunastu lat nie jest prowadzona (patrz Rys. 2). Tylko kilka punktów PS wskazuje na podnoszenie się terenu. Są to pojedyncze obserwacje rozrzucone po całym obszarze i nie tworzące większego skupiska. Północna część omawianego rejonu to tereny o stosunkowo niewielkich szybkościach przemieszczeń, w granicy 0-1 mm/rok.



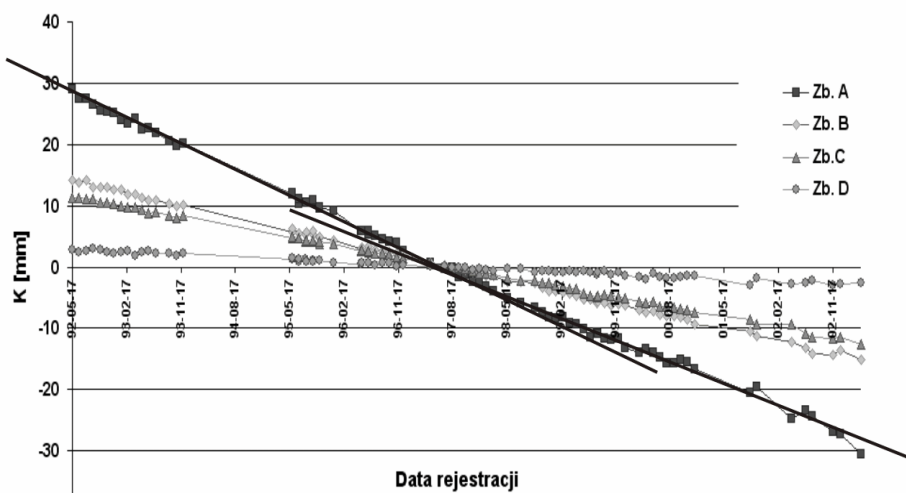
Rys. 2. Obszar Zagłębia Dąbrowskiego z naniesionymi granicami obszarów górniczych, obszarami analiz trendu (obszary A, B, C i D) oraz punktami PS.

W celu analizy przebiegu przemieszczeń występujących w rejonie Zagłębia Dąbrowskiego w latach 1992 do 2003 dla charakterystycznych zbiorów danych (A, B, C, D) zaznaczonych na Rys. 2 zbadane zostały czasowe trendy przemieszczeń powierzchni terenu. Każdy z czterech wskazanych zbiorów danych zawiera punkty PS o charakterystycznych wartościach średniej szybkości przemieszczeń terenu. Zbiór A zawiera punkty, których szybkość osiadań jest większa niż 5 mm/rok. Analogicznie zbiór B to punkty, dla których szybkość osiadań jest większa niż 3 mm/rok, ale mniejsza niż

5 mm/rok. Zbiór C zawiera punkty, których szybkość osiadań jest większa niż 1 mm/rok, ale mniejsza niż 3 mm/rok, zaś zbiór D– to punkty o szybkości przemieszczeń mniejszej niż 1 mm/rok. Na wykresie (Rys. 3) przedstawione zostały (osobno dla każdego zbioru danych – A, B, C, D) średnie wartości przemieszczeń, dla każdego momentu wykonania obrazu radarowego. Uśrednianie miało charakter przestrzenny, to znaczy dla kolejnych obiegów satelity oddzielnie uśredniane były wartości przemieszczeń zarejestrowane we wszystkich punktach należących do poszczególnych zbiorów (A, B, C, D).

Analiza wykresów przedstawionych na Rys. 3 prowadzi do wniosku, że w okresie w którym wykonywano pomiary przemieszczenia terenu charakteryzują się one stałą szybkością (tzn. w całym okresie średnie tempo osiadania jest liniowe). Dokładna analiza trendu wskazuje jedynie na spadek szybkość przemieszczeń terenu po roku 1997. Zmiany takie ujawniają się na wykresie dotyczącym punktów PS o największym tempie osiadania (zbiór punktów w południowej części obszaru górniczego kopalni Paryż). Zmianę tę można wiązać z zaprzestaniem eksploatacji węgla w czerwcu 1995 roku.

Należy nadmienić, że mimo zaprzestania eksploatacji podziemnej nie przzerwano odwadniania wyrobisk podziemnych. Było ono kontynuowane przez cały okres prowadzenia rejestracji satelitarnych. Ponieważ warunki hydrogeologiczne mają znaczny wpływ na dynamikę osiadań terenu jest jasnym, że zmiana tempa osiadań w wyniku zaprzestania eksploatacji (drażenia nowych wyrobisk i chodników) byłaby znacznie większa gdyby towarzyszyło jej zaprzestanie odwadniania.



Rys. 3. Wartości przemieszczeń dla kolejnych zdjęć radarowych dla zbiorów A,B,C i D punktów PS

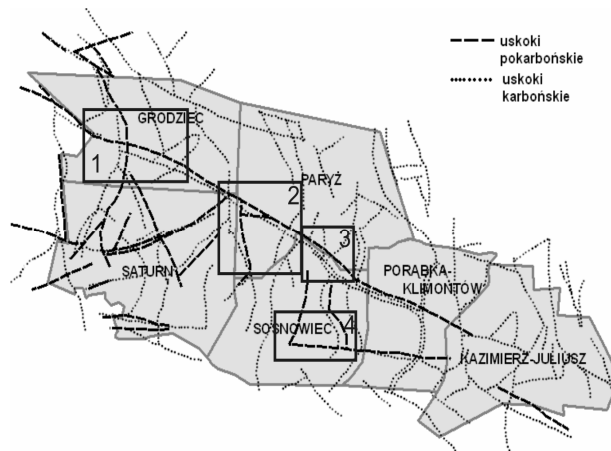
Analiza tempa osiadania na terenach kolejno zamykanych kopalń: Saturn (grudzień 1995), Sosnowiec (grudzień 1997), Grodziec (grudzień 1998) nie wykazała już tak wyraźnych zmian trendu z uwagi na znacznie mniejsze wartości osiadań na obszarach górniczych tych kopalń.

4. GEOSTATYSTYCZNA INTERPRETACJA DANYCH

Jak zostało to już wcześniej zasygnalizowane, osiadanie terenu północno-wschodniej części GZW zaobserwowane dzięki technice PSInSAR, bardzo wyraźnie wskazuje na zależność od budowy tektonicznej. Rodzi się pytanie, czy na wystąpienie osiadań w tym rejonie większy wpływ miała aktywność tektoniczna tego rejonu (występowanie licznych uskoków) czy też intensywna eksploatacja węgla kamiennego.

Zagłębie Dąbrowskie znajduje się w strefie tektoniki fałdowo-blokowej. Na obszarze tym charakterystyczne są jednostki fałdowe o przebiegu NW-SE. Przebieg taki mają również najbardziej znaczące uskoki, w tym uskok będziński (patrz Rys. 4). Są to najczęściej uskoki zrzutowo-przesuwcze, które często koincydują z występującymi również na obszarze zagłębia uskokami normalnymi o przebiegu subpołudnikowym. Porównując przebieg uskoków karbońskich z uskokami pokarbońskimi widać wyraźne podobieństwa. Pokarbońska sieć uskokowa uznawana jest za sieć wtórną noszącą cechy systemu potomnego.

Tak jak dla całego obszaru północno-wschodniej części GZW tak i dla Zagłębia Dąbrowskiego nawet wizualna ocena średnich prędkości przemieszczeń pozwala zauważyć wyraźne związki między osiadaniami terenu a rozmieszczeniem uskoków. Największe osiadania terenu występują w południowych skrzydłach uskoków o przebiegu NW-SE. Maksymalne wartości przemieszczeń są również związane z miejscami występowania wspomnianych wcześniej uskoków z uskokami subpołudnikowymi.



Rys. 4. Rozmieszczenie uskoków na terenie wybranych obszarów górniczych. Prostokątami oznaczono rejony analiz geostatystycznych.

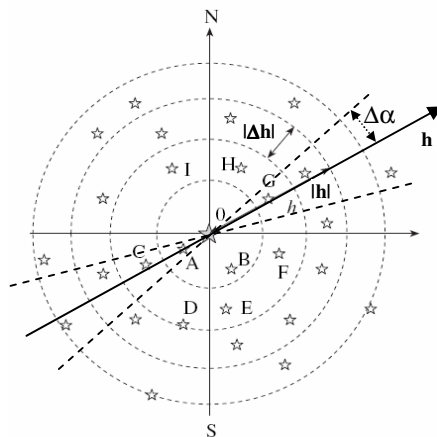
Aby dokładniej zbadać korelację danych PSInSAR z istniejącą na obszarze zagłębia siecią uskoków w obszarach zaznaczonych prostokątami na Rys. 4 przeprowadzona została analiza z wykorzystaniem metod geostatystycznych. Metody te umożliwiają wykorzystanie metod statystycznych do danych posiadających określone położenie w przestrzeni lub w czasie, to znaczy danych które są zmiennymi zregionalizowanymi (Wackernagel, 1995).

Analiza zależności przestrzennej takich danych może odbywać się z wykorzystaniem semiwariogramu (1):

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{i=1}^{N(\mathbf{h})} [d(\mathbf{u}_i) - d(\mathbf{u}_i + \mathbf{h})]^2 \quad (1)$$

Dla określonego zbioru danych przestrzennych powyższy wzór umożliwia obliczenie średniej zmienności (semiwariancji) danych przesuniętych względem siebie o wektor \mathbf{h} . Dla nieregularnego rozkładu punktów obliczenia wartości semiwariogramu dla konkretnego \mathbf{h} są wykonywane z wykorzystaniem danych, których wzajemna odległość mieści się w granicach $[h-\Delta h/2, h+\Delta h/2]$ zaś kierunek różni się od kierunku wyznaczonego przez wektor \mathbf{h} o mniej niż ustalone $\pm\Delta\alpha$ (Rys. 5). Obliczone wartości $\gamma(h)$ obrazują tzw. semiwariogram empiryczny (Rys. 6). Może on być aproksymowany jednym z wielu teoretycznych modeli semiwariogramu. Jednym z nich jest często używany model sferyczny (Wackernagel, 1995).

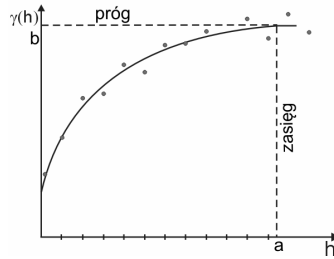
Jednym z dwóch ważnych parametrów tego modelu jest zasięg semiwariancji „a”. Jest to wartość odstepu pomiędzy danymi powyżej której dane przestają być wzajemnie skorelowane w przestrzeni. Z kolei semiwariancja progowa to asymptotyczna wartość kowariancji osiągnięta dla $h > a$, równa standardowej wariancji analizowanej populacji danych. Ponieważ Semiwariogram jest funkcją obliczaną dla określonego kierunku może on wskazywać na istnienie anizotropii w przestrzennym zróżnicowaniu danych. Jeśli semiwariogramy obliczane w tym samym punkcie dla dwóch różnych kierunków będą różnić się co do charakteru funkcji aproksymującej, zasięgu lub progu można wnioskować o kierunkowym zróżnicowaniu analizowanych danych. Jeśli do obliczeń wybierzemy na przykład kierunek linii uskoku i kierunek do niej prostopadły wykryte zróżnicowanie parametrów semiwariogramu będzie świadczyć o jej związku z tektoniką danego obszaru.



Rys. 5. Sposób estymacji semiwariogramu dla danych nieregularnych.

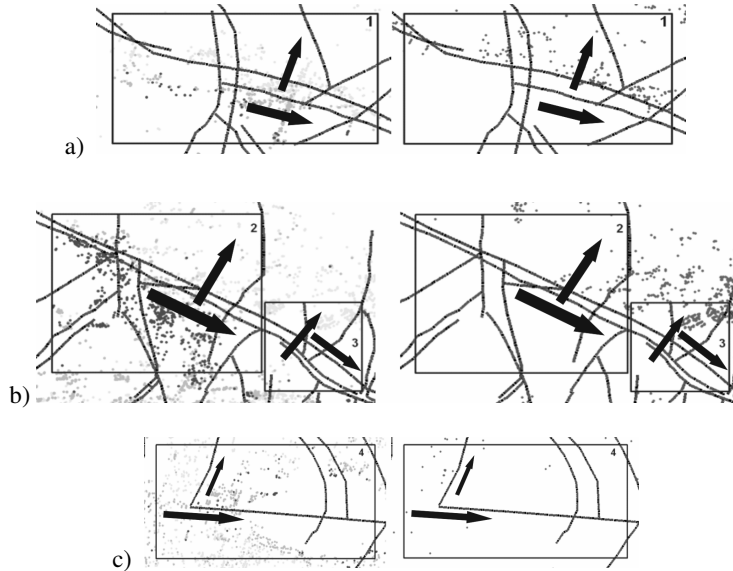
Do szczegółowej analizy geostatystycznej wybrano cztery obszary zaznaczone na Rys. 4 prostokątami 1, 2, 3 i 4. Na Rys.7 przedstawiono w powiększeniu poszczególne obszary analizy wraz z wartościami danych PSInSAR. Nawet pobieżna analiza rozkładu wartości PSInSAR pozwala zauważyć związki między osiadaniem terenu a położeniem

uskoków. Największe osiadania terenu występują w południowych skrzydłach uskoków o przebiegu NW-SE. Maksymalne wartości przemieszczeń są również związane z miejscami przecinania się tych uskoków z uskokami subpołudnikowymi.



Rys. 6. Semiwariogram empiryczny (punkty) wraz z dopasowanym modelem sferycznym semiwariogramu. Zasięg semiwariogramu oznaczono jako "a" zaś semiwariancję progową jako "b".

Przeprowadzona analiza geostatystyczna sprowadzała się do obliczenia dla każdego z okien semiwariogramu w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach, dopasowaniu modelu teoretycznego (wykorzystywano modele sferyczny i model losowy – tzw. semiwariogram nugatowy). Wyniki analizy w poszczególnych obszarach omówiono poniżej.



Rys.7. Średnie szybkości przemieszczeń punktów PS w kolejnych rejonach.
 Lewa kolumna - punktów PS, których szybkość osiadania jest większa niż 1 mm/rok,
 prawa kolumna - stabilnych punktów PS; Strzałki - kierunki obliczeń semiwariogramów.
 Skala odcieni jak na Rys. 2

W rejonie I (obszar górniczy kopalni Grodziec) punkty PS położone są zarówno w skrzydle północnym jak i południowym uskoku. Dla skrzydła południowego charakterystyczne jest osiadanie terenu. W jego obrębie brakuje stabilnych punktów PS, które natomiast są liczne w skrzydle północnym, współwystępując z punktami o niewielkich wartościach tempa przemieszczeń. Analiza geostatystyczna potwierdza zróżnicowanie danych w rejonie uskoku. Semiwariogramy obliczane równoległe do linii uskoku charakteryzowały się znacznie większym zasięgiem (parametr „a”) niż semiwariogramy liczone w kierunku prostopadłym do uskoku.

Rejon badań numer 2 obejmował fragmenty obszarów górniczych kopalń Grodziec, Paryż, Saturn i Sosnowiec natomiast rejon numer 3 fragmenty obszarów górniczych kopalń Sosnowiec i Paryż. Tereny te są poprzecinane licznymi uskokami. W rejonie numer 2 występuje duża koncentracja punktów PS o wysokich wartościach tempa osiadania gruntu. Punkty te znajdują się niemal wyłącznie w skrzydle południowym uskoku o przebiegu NW-SE. Jedynie niewielka ich część położona jest w skrzydle północnym (w strefie gdzie występują uskoki o różnych przebiegach). Osiadanie terenu charakterystyczne jest również dla skrzydła północnego, jednak tutaj wartości przemieszczeń są znacznie mniejsze. Analiza geostatystyczna również tym wypadku wykazała silne uzależnienie zasięgu semiwariogramu od kierunku jego estymacji. W kierunku prostopadłym niejednokrotnie najwłaściwszym modelem był model czysto losowy („nugatowy”), co wskazuje na brak zależności pomiędzy danymi w obu rejonach.

Przemieszczenia terenu w 3 rejonie badań są trudne do interpretacji ze względu na małą liczbę danych PSInSAR. W skrzydle południowym znajduje się niewielka ilość punktów pomiarowych. Wskazują one na osiadanie terenu. W skrzydle północnym uskoku o przebiegu NW-SE występują zarówno punkty stabilne jak i osiadające z niewielką szybkością. Dodatkowo obserwacje oddalone są od linii uskoku. Z uwagi na niewystarczającą liczbę punktów analiza geostatystyczna nie przyniosła jednoznacznych rezultatów.

Rejon badań numer 4 znajduje się w obrębie obszaru górniczego kopalni Sosnowiec. Dominują tutaj punkty PS wskazujące na obniżanie powierzchni gruntu. Część wschodnia obszaru nie zawiera informacji o pionowych ruchach. Analiza geostatystyczna przeprowadzona w rejonie dwóch przecinających się uskoku pokarbońskich jednoznacznie wykazała na zróżnicowanie charakteru osiadań w skrzydłach istniejących uskoku. Należy nadmienić, że różnice w zasięgu semiwariogramów liczonych równoległe i prostopadłe do linii uskoku były w tym przypadku znacznie mniejsze niż w rejonach 1 i 2.

Reasumując analizę danych w oknach 1, 2, 3, 4 można wyróżnić trzy jakościowo różne sposoby zachowania się uskoku przebiegu równoleżnikowym w tym rejonie:

- Pierwszy przypadek to wyraźne obniżenia skrzydła południowego (zrzuconego) i brak przemieszczeń skrzydła północnego uskoku (obszar nr 1)
- Drugi przypadek to równoczesne osiadanie obu skrzydeł uskoku, z wolniejszym osiadaniami skrzydła północnego (wiszącego) (obszar nr 2)
- Trzeci przypadek to równoczesne osiadanie obu skrzydeł uskoku w równym tempie (obszar nr 4)

Z przeprowadzonej analizy nie można natomiast wnioskować o związku między maksymalnymi wartościami przemieszczeń a miejscami krzyżowania się linii uskoku.

5. WNIOSKI

Analizowane przykłady potwierdzają użyteczność techniki PSInSAR do badania osiadań związanych ze współczesnymi ruchami tektonicznymi. W poszukiwaniu odpowiedzi na temat genezy powolnych przemieszczeń terenu w rejonie Zagłębia Dąbrowskiego należy również wziąć pod uwagę prowadzoną w tych rejonach intensywną eksploatację węgla kamiennego. Prowadzona jest ona w złożu silnie poprzecinanym uskokami. Intensywne wydobywanie surowca w pobliżu uskoków mogło spowodować ich uaktywnienie. Proces taki zachodzi w wyniku dynamicznej relaksacji naprężeń generowanych deformacją warstw skalnych jako konsekwencja prowadzonej eksploatacji w sąsiedztwie stref uskokowych. Uaktywnienie uskoku na terenie GZW spowodowane wydobywaniem węgla kamiennego zaobserwowano m.in. w Katowicach. Wartości przemieszczeń terenu indukowane wydobywaniem węgla w strefach uskoków zależą m.in. od typu uskoku, jego kąta nachylenia oraz położenie pola eksploatacyjnego względem płaszczyzny uskoku (skrzydło wiszące, skrzydło zrzucone). Większych wartości przemieszczeń terenu można spodziewać się w miejscach, gdzie spotykają się uskoki o przebiegu równoleżnikowym i południkowym.

Przeprowadzona w pracy analiza przemieszczeń terenu w rejonie Zagłębia Dąbrowskiego miała na celu nie tylko zwrócenie uwagi na występujące tam zjawisko subsydencji, ale również podkreślenie znaczenia nowego źródła informacji, jakim jest technika PSInSAR. Dane otrzymane w wyniku przetwarzania wielu obrazów radarowych mogą okazać się bardzo istotne, nie tylko w planowaniu zagospodarowania przestrzennego, ale stanowić mogą również źródło informacji dla geologów badających współczesną aktywność tektoniczną. Integracja danych PSInSAR z innymi rodzajami danych (np. w ramach systemów GIS) pozwoli w sposób optymalny wykorzystać informacje otrzymane w wyniku przetworzenia obrazów radarowych. Takie rozwiązanie przyczyni się do ugruntowania pozycji PSInSAR wśród innych technik monitorujących powierzchnię Ziemi.

6. LITERATURA

Ferretti A., Prati C., Rocca F., 2001. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39, s. 8-20.

Wackernagel, H., 1995. *Multivariate Geostatistics*, Springer, Berlin.

Pracę zrealizowano w ramach badań własnych Wydziału GGiOŚ AGH Nr 10.10.140.571

**DETECTION OF THE VERTICAL GROUND DISPLACEMENTS IN MINING
AREAS USING PSINSAR RADAR SATELITE INTERFEROMETRY**

KEY WORDS: PSInSAR, subsidence, GZW

SUMMARY: Detection of the vertical ground displacements in mining areas using PSInSAR (Permanent Scatterer Synthetic Aperture Radar Interferometry) data in a northern-eastern part of Upper Silesia Coal Basin is presented in the paper. PSInSAR technique improves the ability to determine small-scale displacements of individual features (scatterers) on the surface. It uses radar images collected over the target area by a SAR satellite between 1992 and 2003. Using the PSInSAR method, we can resolve surface motions at a level of 0.5 mm/year, and resolve very small-scale features, including motions of individual targets such as roofs, pipelines, bridges. These small movements might result from regional isostatic movements of Upper Silesia region and/or the subsiding caused by mining activity. Analysis of subsiding values in Dabrowskie Coal Basin mining area has been performed using geostatistic methods. These methods use the semivariogram function, which describes dissimilarity between the parameter values, depending on the distance between places, where it was measured and the mutual orientation. Results obtained from geostatistical analysis of PSInSAR data do not indicate the dependency between values of ground motion and mining areas locations. In contrary, the subsiding revealed by PSInSAR technique distinctly indicates a correlation with faults system. It was shown that the greatest values of ground settlements occur in the downthrown blocks and near zones, at the crossing point of the faults lines.

Dr hab. inż. Andrzej Leśniak
e-mail: lesniak@agh.edu.pl
Telefon: (+48)126172368
fax: (+48)126332936

Mgr inż. Stanisława Porzycka
porzycka@agh.edu.pl
Telefon: (+48)126172368
fax: (+48)126332936