

Dr inż. Maria Przyłucka^{*)}

Geostatystyczna analiza uwarunkowań pionowych przemieszczeń terenu zidentyfikowanych przy pomocy interferometrii satelitarnej na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego

Geostatistical analysis of vertical ground displacements identified by satellite interferometry in the Upper Silesian Coal Basin

Treść: Celem pracy jest zaprezentowanie różnych możliwości wykorzystania satelitarnych danych przetworzonych technikami interferometrii radarowej dla badań pionowych przemieszczeń terenu na obszarze czynnych i zamkniętych kopalń węgla kamiennego. W pracy wykorzystano cztery zestawy danych, w tym zestaw danych rastrowych, interferogramów różnicowych, pozyskanych w technice *Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar* (DInSAR) oraz trzy zestawy danych punktowych, pozyskanych w technice *Persistent Scatterer Interferometry* (PSInSAR). Dane obejmowały fragmenty obszaru Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) i posłużyły do przeprowadzenia analiz na dwóch obszarach badawczych: „Katowice” (kopalnie czynne) i „Będzin” (kopalnie zlikwidowane). Wykorzystany bogaty zbiór danych pozwolił na określenie przydatności poszczególnych typów danych, jak również wykorzystanych zakresów obrazowania radarowego, do badania pionowych przemieszczeń powierzchni terenu. Analiza powolnych przemieszczeń terenu, zidentyfikowanych na danych punktowych PSInSAR, umożliwiła identyfikację zasięgu wpływów działalności górniczej. Dodatkowo, na przykładzie obszaru kopalni zamkniętych „Będzin” pokazano znaczącą zmianę charakteru występujących pionowych ruchów terenu przed i po zamknięciu kopalni. Analiza szybkich, rzędu centymetrów na miesiąc, przemieszczeń została przeprowadzona na obszarze „Katowice” w oparciu o zestaw danych interferogramów różnicowych. Poprzez zsumowanie wartości osiadania otrzymanych na pojedynczych obrazach, otrzymano mapę przemieszczeń pionowych dla okresu 15 miesięcy. W dalszej części pracy przedstawiono połączenie dwóch typów informacji, punktowej o niewielkich przemieszczeniach oraz rastrowej o dużych przemieszczeniach. Zostało ono przeprowadzone poprzez jednoczesną interpolację otrzymanych wartości, czego wynikiem była kompleksowa mapa pionowych przemieszczeń terenu, przedstawiająca pełen, prosty w odbiorze obraz zmian zaszłych dla okresu luty 2007 – maj 2008 na obszarze Katowic.

Abstract: The aim of this paper is to present various possibilities of using satellite data processed by radar interferometry techniques for vertical displacement in active and closed coal mines. Four sets of data were used, including one raster data set, differential interferometers processed in *Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar* (DInSAR) technique, and three sets of point data obtained using the *Persistent Scatterer Interferometry* (PSInSAR, PSI) technique. The data included fragments of the Upper Silesian Coal Basin (USCB) area and were used to carry out analyzes of vertical movements in two research areas: „Katowice” (active coal mining area) and „Będzin” (abandoned mining area). The rich set of data allowed to determine the suitability of particular types of data for analysis of vertical deformation of the surface. An analysis of the slow displacement identified on the PSInSAR data points has allowed for identification of the extent of the influence of the mining activity. In addition, the example of the closed mine site „Będzin” shows a significant change in the nature of the occurring vertical movements of the area before and after the closure of the mine. Analysis of fast, centimeters-per-month displacements was carried out in the area of „Katowice” based on the data set of differential interferograms. By aggregating the subsidence values received on individual images, a vertical displacement map for the 15-month period was obtained. In the following part of the paper a combination of two types of information, a small displacement, and a fast displacement has been presented. It was carried out by simultaneous interpolation of the values obtained, resulting in a comprehensive map of vertical displacements for two research areas, showing a full, simple image of deformation occurring between February 2007 and May 2008 in Katowice.

Słowa kluczowe:

InSAR, GZW, pionowe przemieszczenia, interferogramy, szkody górnicze

Key words:

InSAR, USCB, vertical displacements, interferograms, mining damage

1. Wprowadzenie

Celem pracy jest zaprezentowanie różnych możliwości wykorzystania satelitarnych danych przetworzonych techni-

kami interferometrii radarowej dla badań obniżenia terenu na obszarach czynnych i zamkniętych kopalń węgla kamiennego.

Metody interferometrii radarowej zaczęto rozwijać na początku lat 90. XX wieku, kiedy to dane z satelitów ERS-1 i ERS-2 wykorzystano do generowania interferogramów radarowych. Uzyskano to poprzez złożenie obrazów tego samego obszaru, pozyskanych w różnym czasie. Obecnie techniki te

^{*)} Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa

zostały szeroko rozwinięte i z powodzeniem wykorzystywane są do monitorowania zmian topograficznych powstałych poprzez takie procesy jak: osuwiska, wulkanizm, trzęsienia ziemi, ruch lodowców, zmiany poziomu wód podziemnych czy górnictwo podziemne.

W pracy porównano wyniki uzyskane z różnych zestawów danych, zbadano ich wzajemną komplementarność oraz możliwości łączenia. Badania prowadzono dla dwóch obszarów badawczych: dla rejonu Katowic będącego pod wpływem działalności kopalni KWK Wujek oraz rejonu Będzina, gdzie eksploatacja została zakończona około roku 2000. Głównym efektem prac jest przedstawienie możliwości statystycznego opracowania danych punktowych PSI oraz połączenie informacji pochodzącej z danych różnych zestawów (punkty PS i interferogramy) pomiędzy sobą, w celu uzyskania jak najbardziej komplementarnej informacji o pionowych przemieszczeniach terenu na badanym obszarze. Informacja ta została przedstawiona w postaci mapy pionowych przemieszczeń terenu.

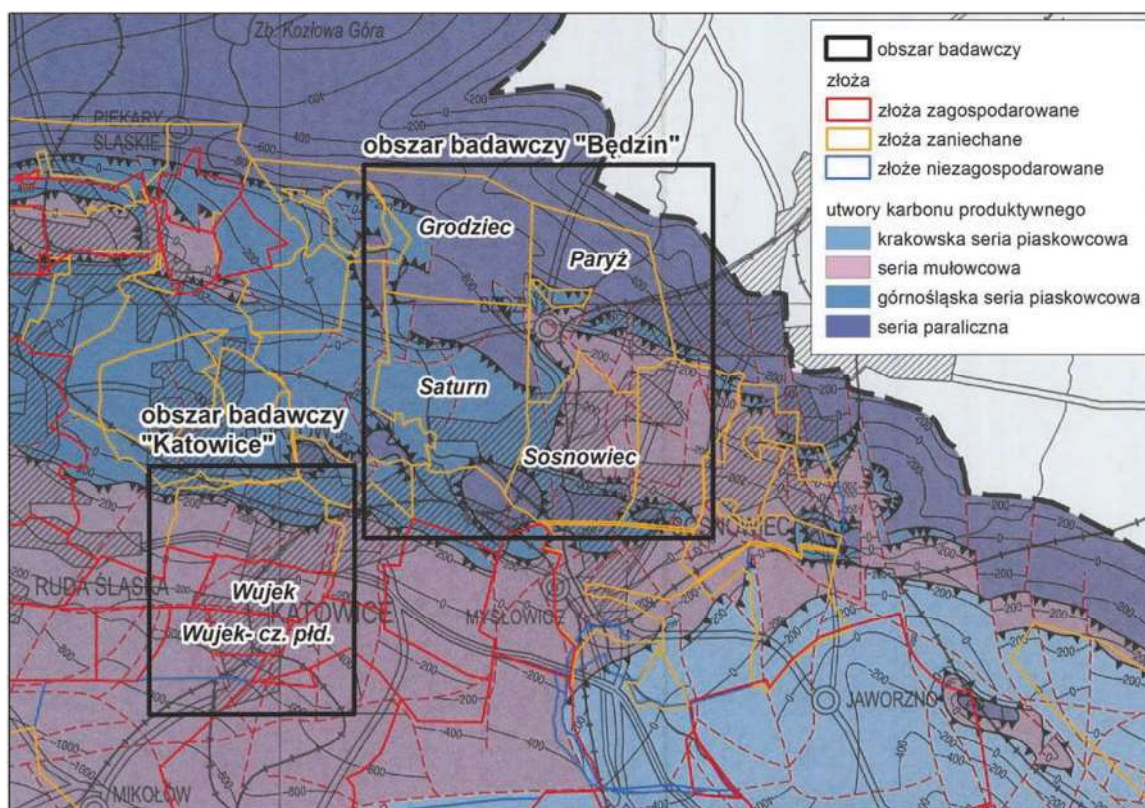
2. Obszar badań

Obszar badań znajduje się w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym (GZW), które jest jednym z największych obszarów wydobycia węgla kamiennego w Europie. Szczegółowe obszary badawcze wyznaczono w oparciu o zasięg wykorzystanych zestawów danych oraz zróżnicowanie aktywności górniczej. Wyznaczono dwa obszary nazwane „Katowice” i „Będzin”, których granice przedstawiono na rysunku 1.

Obszar „Katowice” obejmuje czynną KWK Wujek której powierzchnia wynosi 65 km². Dane wykorzystane do analizy pionowych przemieszczeń terenu obejmowały okres od 2003 do 2010, a w szczególności od 2007 do 2008 roku, w którym to okresie prowadzona była intensywna eksploatacja podziemna. Obszar obejmuje złoża Wujek i Wujek-część Stara Ligota. Historia kopalni rozpoczęła się w 1804 roku, jednak oficjalnie kopalnia została zarejestrowana sto lat później, w 1904. Obecna KWK Wujek powstała z połączenia w 2005 roku KWK Śląsk i KWK Wujek, składa się z Ruchu Śląsk i Ruchu Wujek i należy do Polskie Grupy Górniczej sp. z o.o. (KWK Wujek 2016). Złoża Wujek i Wujek-część Stara Ligota są eksploatowane systemem ścianowym lub ścianowym z podsadzką. Dla złoża Wujek średnia głębokość spągu eksploatowanych pokładów wynosi 685 m, natomiast dla części Stara Ligota wynosi 1000 m. Miąższość złóż waha się od 780 do 960 m (MIDAS ... 2016).

Obszar „Będzin” znajduje się na terenach byłej eksploatacji kopalń: Grodziec, Paryż, Saturn oraz Sosnowiec i obejmuje powierzchnię około 167 km². Wykorzystane zestawy danych obejmują okres tuż przed zamknięciem i po zamknięciu kopalni (od 1992 do 2010 roku). Umożliwiają one analizę zmian powierzchni terenu po zaprzestaniu działalności górniczej. Początki górnictwa węgla kamiennego na tych obszarach sięgają 1823 roku, kiedy to została uruchomiona mała kopalnia Barbara. Eksploatacja była prowadzona z wielu pokładów węgla, systemem na zawał stropu i z podsadzką hydrauliczną. Wydobycie węgla zakończono w latach: KWK Grodziec i Paryż – 2001, KWK Sosnowiec – 1997, KWK Saturn – 1995 (Graniczny i in. 2014a, 2014b).

Obniżenia są jednym z najbardziej istotnych zagrożeń związanych z podziemną działalnością górniczą. W wyniku



Rys. 1. Lokalizacja obszarów badawczych „Katowice” i „Będzin” na tle Mapy geologiczno-strukturalnej utworów karbonu produktywnego (Jureczka i in. 2005) wraz z granicami złóż węgla kamiennego (MIDAS ... 2016)

Fig. 1. Location of the research areas „Katowice” and „Będzin” superimposed on the Structural-geological map of the carboniferous coal-bearing deposits (Jureczka et al. 2005) together with the boundaries of hard coal deposits (MIDAS ... 2016)

wydobycia węgla następuje naruszenie górotworu i na skutek jego odkształcenia oraz zmian naprężeń występujących w nadkładzie powstają przemieszczenia na powierzchni terenu. Mogą one mieć charakter natychmiastowy lub długotrwały, związany z konsolidacją gruntów i zależny od szybkości rozpraszania ciśnienia w gruntach. Osiadanie może powodować poważne uszkodzenia struktur budynków i infrastruktury znajdującej się w rejonie eksploatacji. Wpływ osiadania zależy od wielu czynników związanych z rodzajem i wielkością wydobywania, rodzajem i wielkością konstrukcji budowli, jak również samą szybkością zachodzących zmian. Osiedlenia górnicze na terenie GZW były obiektem badań (Białek i in. 2014, Borecki 1980, Budryk 1947, Knot 1957, Knot i in. 1995, Konopko 2010, Kowalski 2015, Kwiatek 1997-18, Popiołek 2009, Strzałkowski 2010).

Najczęściej stosowanym systemem eksploatacji na terenie GZW jest system ścianowy z zawalem stropu lub z podsadzką hydrauliczną. Obniżenie nad typową ścianą eksploatacyjną znajdującą się na głębokości 680 metrów, o wysokości 2,5 metra i długości od 250 do 400 metrów, sięga do 70% wysokości warstwy, co odpowiada największemu pionowemu przemieszczeniu 0,75 – 2,0 m w centralnej części niecki obniżeniowej (Kowalski 2015). Z uwagi na eksploatację wielu pokładów, pionowe przemieszczenia na terenie GZW dochodzą lokalnie do dziesiątków metrów. Prace górnicze koncentrowane są zwykle na 3-4 ścianach rocznie, tak aby wpływ na powierzchnię był jak najmniejszy (Borecki 1980).

Pionowe przemieszczenia terenu są monitorowane przy wykorzystaniu tradycyjnych metod geodezyjnych (niwelacja precyzyjna i techniczna oraz pomiary GNSS) oraz sporadycznie za pomocą różnicowych analiz wysokorozdzielczych numerycznych modeli terenu pozyskanych za pomocą LIDAR-u. Szybki rozwój teledetekcyjnych metod obrazowania Ziemi pozwala na badanie możliwości ich wykorzystania do detekcji i monitoringu dynamicznych zmian powierzchni terenu. Wśród tych metod najbardziej użyteczną okazała się różnicowa interferometria radarowa.

3. Zastosowane metody badawcze

3.1. Satelitarna interferometria radarowa

Technika satelitarnej radarowej interferometrii różnicowej (*Differential SAR Interferometry*, DInSAR), będąca tradycyjną metodą tworzenia interferogramów, polega na złożeniu obrazów tego samego obszaru wykonanych w różnym czasie (Ferretti i in. 2007). Poprzez obliczenie różnicy fazy odbitej fali pomiędzy odpowiadającymi sobie, tymi samymi pikselami z dwóch obrazów a następnie jej rozwinięciu, otrzymywane są prążki interferometryczne, które obrazują wielkość zmiany powierzchni terenu, która miała miejsce na badanym obszarze w czasie pomiędzy rejestracją tych obrazów (zwykle około miesiąca, dwóch). Umożliwia to rejestrację deformacji od centymetrów po decymetry (w zależności od długości użytej fali).

Technika przetwarzania stabilnych rozpraszaczy (*Persistent Scatterer Interferometry*, PSInSAR lub PSI) obejmuje przetwarzanie na raz kilkudziesięciu scen radarowych (Crossetto i in. 2015, Ferretti i in. 2001). Uzyskuje się w ten sposób zbiór kilkudziesięciu – kilkuset tysięcy punktów (PS - *persistent scatterer* - tłumaczonych w Polsce jako stabilne rozpraszacze) zarejestrowanych w wyniku silnego odbicia promieniowania radarowego od budynków, mostów i innych obiektów. W wyniku przetworzenia, dla każdego z punktów obliczana jest informacja o prędkości ruchu w kierunku obrazowania satelity (*line-of-sight*, LOS) w milimetrach na rok. Technika ta umożliwia pozyskanie informacji

o szybkości zachodzących zmian, o ile są one powolne. Punkty nie są generowane, jeśli prędkość ruchu terenu jest większa niż ok. 15 cm/rok dla satelitów z pasma C i 25 cm/rok dla satelitów z pasma X.

Przykłady wykorzystania technik interferometrii radarowej (SAR *Interferometry*, InSAR) na terenach górniczych na świecie można znaleźć w (Herrera i in. 2007, Wegmuller i in. 2004). Dane interferometryczne pozyskane w technice PSI pozwalają na monitoring osiadań do kilkudziesięciu milimetrów na rok, natomiast interferogramy pozyskane tradycyjną techniką DInSAR pozwalają na identyfikację szybszych zmian i rejestrację obniżeń sięgających decymetrów na miesiąc. Badania nad wykorzystaniem danych interferometrii radarowej na obszarze GZW były prowadzone w Polsce między innymi przez (Czarnogórska 2010, Graniczny i in. 2008, Perski 1998, Popiołek i in. 2006, Przyłucka i in. 2015a, 2015b, Przyłucka Graniczny 2015, Sopata 2013, Strzelczyk i in. 2009). Badania te wykazały zasadność wykorzystania danych interferometrycznych dla analizowanych obszarów oraz na wyciągnięcie wniosków na temat wad i zalet stosowania każdego z trzech pasm radarowych: C, L i X oraz technik przetworzeń DInSAR i PSInSAR do detekcji osiadania terenu spowodowanego podziemną działalnością górniczą. Między innymi stwierdzono, iż dane PS z zakresu C umożliwiły wyznaczenie granicy obszaru poddanego wpływowi działalności kopalni, ale nie dały informacji o większych osiadaniach niż 3 cm na rok. Informacja ta została uzupełniona przez interferogramy różnicowe z zakresu L, jednakże inny sposób przetwarzania i prezentacji wyników utrudnił łączną analizę danych. Dane punktowe PS wykorzystano do analizy ogólnej niewielkich przemieszczeń oraz wykresów czasowych zmian występujących w konkretnych, wybranych lokalizacjach. Interferogramy różnicowe pozwoliły natomiast na identyfikację rozwoju niecek i okazały się przydatne w długookresowej analizie występowania przyrostów pionowych przemieszczeń terenu powodowanych podziemną aktywnością górniczą.

Wnioski z poprzednich prac badawczych z terenu GZW zostały wykorzystane i rozszerzone w pracy poprzez zastosowanie metod geostatystycznych w celu łatwiejszej interpretacji danych oraz ich połączenia.

3.2. Geostatystyka

Geostatystyka to gałąź matematyki stosowanej, wykorzystywanej w wielu dziedzinach nauki i przemysłu, gdzie zachodzi potrzeba oceny skorelowania danych w czasie lub przestrzeni (Kaneyski 2013). Narzędzia geostatystyczne wykorzystane w pracy posłużyły do połączenia informacji otrzymanej z przetworzeń danych SAR, pochodzących z różnych źródeł (różnych pasm radarowych, ale również różnych typów przetworzeń). Równocześnie poprzez interpolację danych uzupełnione zostały te miejsca, gdzie występował brak danych wraz z oszacowaniem błędu predykcji. Zastosowane metody geostatystyczne pozwoliły na otrzymanie ze złożonego zbioru danych rastrowych i wektorowych jednolitego produktu, jakim są mapy obniżeń dla konkretnych przedziałów czasowych.

Zasady geostatystyki zostały opracowane przez (Matheron 1963) i rozbudowane w późniejszych pracach (Kaneyski 2013). Geostatystyka zajmuje się zjawiskiem występowania zmiennej $Z(x)$ w przestrzeni jako procesu losowego, gdzie x oznacza lokalizację argumentu w przestrzeni dwuwymiarowej. Dostępne dane pomiarowe ($Z(x_1), \dots, Z(x_N)$) w N lokalizacjach (x_1, \dots, x_N) są traktowane jak realizacje procesu losowego $Z(x)$ (Kaneyski 2013), a estymacja wartości zmiennej w pozostałych lokalizacjach należy do podstawowych zadań geostatystyki. Spośród wielu metod interpolacji, w pracy z danymi o charakterze przyrodniczym, najbardziej popularną

metoda jest kriging, wykorzystywany również do interpolacji danych PSInSAR (Strzelczyk i in 2009). Modele krigingu w trakcie interpolacji biorą pod uwagę zarówno odległość, jak i wzajemną relację pomiędzy danymi, ale efekt wygładzenia będący jednym z rezultatów estymacji może stanowić istotną wadę, gdyż w rzeczywistości dane mogą być dużo bardziej zróżnicowane. Metoda stochastycznych symulacji pozwala na określenie wielu, równo-prawdopodobnych rozwiązań. W rezultacie otrzymywana jest seria estymacji, zawierających się w prawdopodobnym zakresie, a nie tylko jedno, najlepsze rozwiązanie (Kaneyski 2013). W pracy wykorzystano metodę warunkowych symulacji Gaussa, opierając się na doświadczeniach (Sanabria i in. 2014). Metodyka obejmowała interpolację metodą Simple Kriging, której model semiwariogramu wraz z danymi wejściowymi posłużył następnie do wygenerowania stu równo-prawdopodobnych rozwiązań estymacji metodą warunkowych symulacji Gaussa. Wynik przetworzenia zawierał wartość średnią (ze stu otrzymanych realizacji), prawdopodobieństwo przekroczenia zadanej wartości progowej (uznanej za wartość stabilną dla danego zestawu danych) oraz odchylenie standardowe rozkładu stu realizacji.

Kompleksowa analiza, mająca na celu połączenie informacji o bardzo szybkich przemieszczeniach pionowych, pozyskanej z obrazów rastrowych, z wartościami niewielkich pionowych przemieszczeń terenu, zarejestrowanych na punktach PS, pozwoliła na opracowanie mapy pionowych przemieszczeń terenu dla obszaru „Katowice” (dla okresu

22.02.2007 – 27.05.2008). Wykonanie mapy składało się z dwóch etapów:

Etap 1 – opracowanie sumarycznych pionowych przemieszczeń terenu zidentyfikowane na wszystkich interferogramach z danego okresu a następnie przedstawienie tych danych w formie punktowej i złączenie ze zbiorem danych PS, przy czym pomierzone wartości w kierunku LOS przeliczone zostały do kierunku pionowego poprzez podzielenie przez cosinus kąta padania wiązki radarowej.

Etap 2 – interpolacja łącznego zbioru danych punktowych metodą Simple Kriging, a następnie metodą warunkowych Symulacji Gaussa.

4. Charakterystyka wykorzystanych danych

Do badań przemieszczeń pionowych na wybranych obszarach badawczych wykorzystano zestawy danych InSAR, których charakterystyka znajduje się w tabeli 1.

Do analizy zmian powierzchni terenu na obszarze kopalni zamkniętych (zlikwidowanych) „Będzin” wykorzystano dwa zestawy danych PS (rysunek 2): zestaw ERS, przedstawia niewielkie osiadania zaistniałe w okresie od 17 maja 1992 r. do 9 kwietnia 2003 r., a więc w końcowym okresie działalności kopalni. Drugi zestaw danych obejmował punkty PS z satelity Envisat z okresu od 4 listopada 2002 r. do 13 września 2010 r. Zestaw ten obejmuje okres, kiedy kopalnie były już w trakcie likwidacji i rozpoczął się proces ich odwadniania.

Tabela 1. Charakterystyka wykorzystanych zestawów danych
Table 1. Characteristics of data sets

Zestaw danych	Envisat	ALOS	ERS	Envisat
Obszar badań	Katowice	Katowice	Będzin	Będzin
Obszar górniczy	Kopalnia czynna KWK Wujek	Kopalnia czynna KWK Wujek	Kopalnie zamknięte: KWK: Paryż, Grodziec, Sosnowiec, Saturn	Kopalnie zamknięte: KWK: Paryż, Grodziec, Sosnowiec, Saturn
Metoda przetworzenia	PSInSAR	DInSAR	PSInSAR	PSInSAR
Przedział czasowy danych	05/03/2003-29/09/2010	22/02/2007- 27/05/2008	17/05/1992-09/04/2003	04/11/2002-13/09/2010
Liczba scen	31	6	79	24
Długość fali [cm]	5,6	23,6	5,6	5,6
Kąt padania wiązki [stopnie]	23	nd.	23	23
Minimalna różnica czasowa pomiędzy dwoma scenami [dzień]	35	46	35	35
Rozdzielczość przestrzenna obrazu SAR [m]	30	10	30	30
Piksel wynikowego interferogramu różnicowego [m]	nd.	20	nd.	nd.
Liczba interferogramów	nd.	5	nd.	nd.
Gęstość punktów PS w całym zestawie danych [liczb/km ²]	67	nd.	25	235
Powierzchnia objęta analizą [km ²]	65	65	167	167
Gęstość punktów PS w obszarze objętym analizą [liczb/km ²]	108	nd.	47	307
Liczba punktów PS	7069	nd.	7812	50887
Średnia wartość prędkości punktów PS w kierunku LOS [mm/rok]	-1±3	nd.	-1±1	1±2
Minimalna i maksymalna wartość prędkości punktów PS w kierunku LOS [mm/rok]	-18 +4	nd.	-11 +2	-14 +11
Projekt, w ramach którego zrealizowane było przetworzenie	DORIS	TerraFirma I	TerraFirma I	TerraFirma III
Firma/osoba przetwarzająca	Tele-Rilevamento Europa	Gamma Remote Sensing	Gamma Remote Sensing	Gamma Remote Sensing
Literatura z opisem całego zestawu danych	[9-10]	[5], [9], [25]	[5], [8]	[9-10]

Obszar w większości jest stabilny, jednakże w północno-zachodniej części widoczne jest duże nagromadzenie punktów o niewielkich, do 1 cm na rok, wartościach dodatnich.

Zestawy danych PS dla obszaru „Będzin”, porównano z odczytami rzędnych lustra wody podziemnej z pięciu piezometrów (rysunek 3). Odczyty obejmowały wskazania poziomu wody co pół roku od grudnia 2001 r. (dla czterech piezometrów umieszczonych w szybach kopalni węgla kamiennego Grodziec, Saturn, Sosnowiec i Paryż) oraz od grudnia 2006 r. (dla piezometru umieszczonego na terenie KWK Grodziec).

Do badań przemieszczeń pionowych na obszarze „Katowice” wykorzystano zestaw danych PS pochodzących z przetworzeń obrazów satelity Envisat oraz 5 interferogramów różnicowych satelity ALOS-PALSAR (rysunek 4). Punkty PS z okresu od 5 marca 2003 r. do 29 września 2010 r. są zlokalizowane głównie na terenach zurbanizowanych, gdyż obszary rolnicze lub pokryte gęstą roślinnością charakteryzują się słabym i niestabilnym w czasie odbiciem fali radarowej. Brak punktów w centralnej części analizowanego obszaru, gdzie spodziewane są największe osiadania, jest również spowodowany ograniczeniem metody PSInSAR w rejestracji szybkich, nieliniowych zmian. Największe, decymetrowe, przemieszczenia pionowe zostały natomiast zarejestrowane na pięciu interferogramach różnicowych satelity ALSO-PALSAR, łącznie obejmujących okres od 22 lutego 2007 r. do 27 maja 2008 r.

Do szczegółowego określenia wiarygodności danych pochodzących z przetworzeń InSAR wykorzystano pomiary niwelacji precyzyjnej wykonane przez KWK Wujek. W badaniach wykorzystano te repery, na których prowadzony monitoring pokrywał się czasowo z zestawami danych InSAR. Wybrano 448 reperów naziemnych z osiemnastu linii pomiarowych oraz 196 reperów ściennych, na których prowadzono pomiary w cyklach półrocznych w okresie od kwietnia 2003 r. do października 2010 r. (do porównania z punktami PS Envisat) lub od maja 2007 r. do października 2008 r. (do porównania z interferogramami satelity ALOS). Średnia różnica wartości pionowych przemieszczeń terenu wynosiła 5 mm dla punktów PS oraz 10 mm dla interferogramów.

5. Wyniki analiz przemieszczeń pionowych

5.1. Obszar kopalni zamkniętych „Będzin”

Z danych zestawu ERS wynika, iż na obszarze badawczym w okresie 1992-2003 występowały niewielkie obniżenia terenu (rysunek 2a). Okres ten wypada na końcowe lata pracy kopalni oraz pierwsze lata po zamknięciu. Zupełnie inny obraz przemieszczeń terenu przedstawia zestaw danych PS z satelity Envisat (rysunek 2b) dla okresu 2002-2010, to jest po zamknięciu kopalni. Większość obszaru badawczego jest stabilna, jednakże w północno-zachodniej części widoczny jest obszar niewielkiego podnoszenia, do 11 mm na rok.

Od 2001 na omawianym terenie pogórnym działa Centralny Zakład Odwadniania Kopalń (CZOK), którego zadaniem jest zabezpieczenie kopalń czynnych przed zagrożeniem wodnym, poprzez odwadnianie zlikwidowanych kopalń węgla kamiennego z zastosowaniem pompowni stacjonarnych lub głębinowych, stosując system odwadniania głębinowy lub grawitacyjny. Na rysunku 3 przedstawiono wykresy czasowe uśrednionych wartości wszystkich punktów PS, znajdujących się w promieniu 300 metrów od piezometrów CZOK, nazwanych: Wojkowice, Grodziec II, Cieszkowski, Paweł i Szczepan. Wykresy te przedstawiają wartości przemieszczenia pomierzone dla każdej pozyskanej sceny, względem sceny referencyjnej oraz punktu referencyjnego. Analiza

wykresów pozwala zaobserwować główny trend pionowych przemieszczeń terenu, które zaszły w badanym okresie. Wykresy punktów zestawu ERS, reprezentujących stan sprzed i tuż po zamknięciu kopalni wskazują na trend osiadania. Zupełnie inny charakter zmian jest widoczny na wykresach punktów PS zestawu Envisat, reprezentujących okres po zamknięciu kopalni. Na wszystkich punktach widoczny jest trend wznoszący.

Podnoszenie terenu jest najprawdopodobniej spowodowane zmianą poziomu wody gruntowej. Potwierdzają to wykresy rzędnych lustra wody pomierzonych w pięciu piezometrach, porównane z względnymi przemieszczeniami zaobserwowanymi na punktach PS (rys. 3).

Zestawy danych ERS oraz Envisat II zostały poddane interpolacji Simple Kriging. Na podstawie interpolacji zostały wyznaczone granice obszarów poddanych niewielkim pionowym przemieszczeniom terenu. Dla okresu 1992-2003, a więc obejmującego ostatnie lata pracy kopalni oraz pierwsze lata po ich zamknięciu, wyznaczono granice terenu osiadającego, natomiast dla okresu 2002-2010, po zamknięciu kopalni, wyznaczono granice terenu podnoszącego się (rys. 2c).

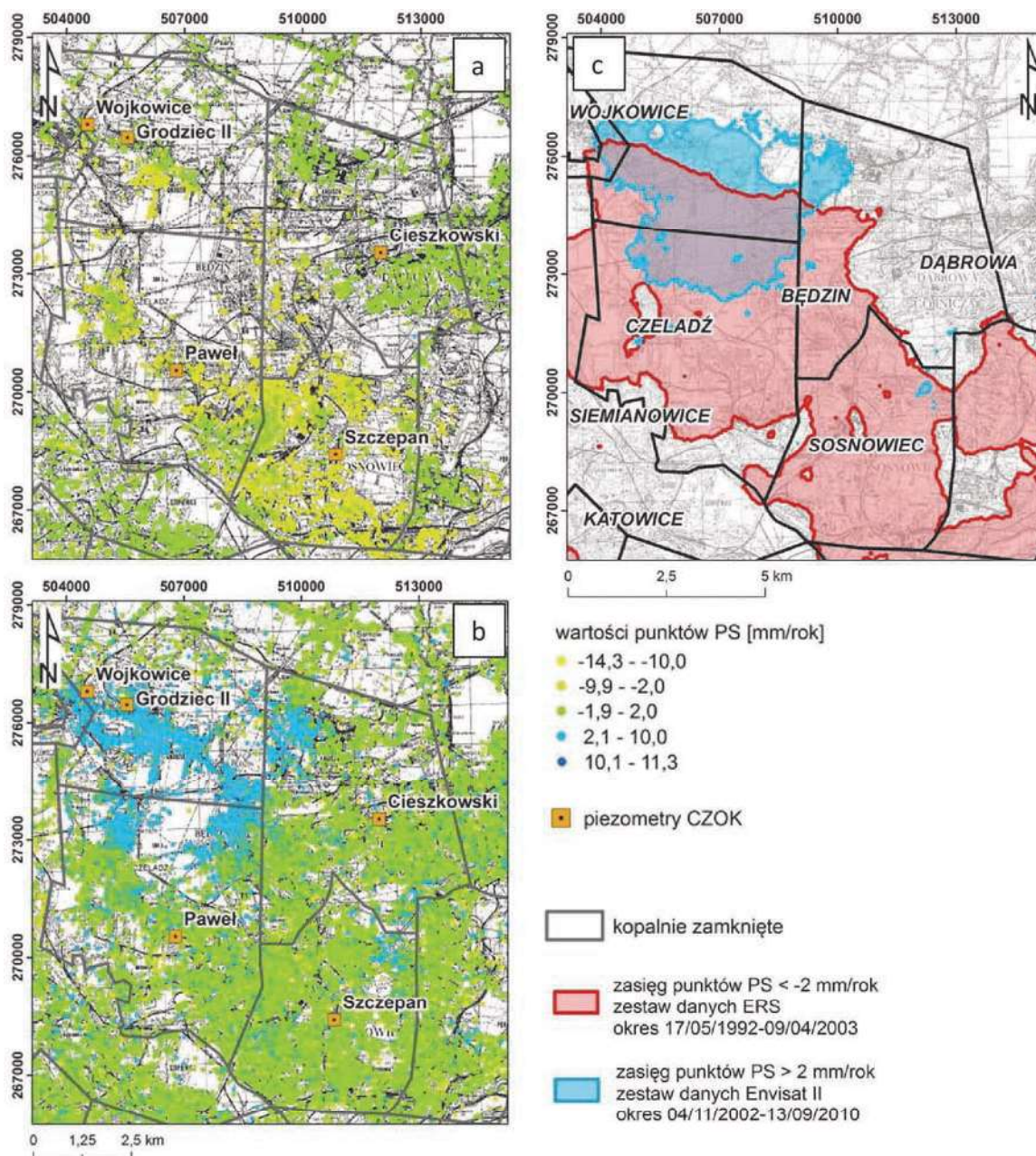
5.2. Obszar „Katowice” o czynnej działalności górniczej

Dla obszaru „Katowice” duże przemieszczenia centymetrowe i decymetrowe zostały odzwierciedlone na pięciu interferogramach o następujących datach początkowych i końcowych scen: 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. Przykładowy interferogram przedstawiono na rysunku 4e. Różnica pomiędzy sceną początkową a końcową wynosiła 46, 92 lub 138 dni. Sumaryczne przemieszczenia pionowe otrzymano poprzez zsumowanie wartości osiadania z każdego interferogramu. Obraz wynikowy, o rozdzielczości 40 m, na którym każdemu pikselowi przyporządkowano konkretną wartość osiadania, reprezentuje powierzchnię przemieszczeń pionowych dla okresu 22.02.2007-27.05.2008. Otrzymane wartości dużych przemieszczeń zostały następnie przekonwertowane do zestawu punktowego.

Niewielkie przemieszczenia dla obszaru „Katowice” zostały wyznaczone na punktach PS zestawu Envisat (rys. 4d). Cały zbiór danych Envisat zawierał informacje o średnich prędkościach pionowych zmian powierzchni terenu w okresie od 2003 do 2010 roku, jednakże w kompleksowej analizie ograniczono się do wartości przemieszczeń tylko z okresu od 2007 do 2008 roku, tak aby możliwie najbardziej pokrywały się z okresem interferogramów ALOS. Oba zbiory punktowe (otrzymane z sumowanych interferogramów oraz zestaw PS) połączono, tworząc jeden zbiór punktów zawierających informacje o osiadaniach na obszarze badawczym „Katowice” w okresie od lutego 2007 do maja 2008.

Kompleksowe zbiory punktów interpolowano, otrzymując trzy mapy końcowe: mapę średnich wartości całkowitego przemieszczenia pionowego (rysunek 4a), mapę prawdopodobieństwa przekroczenia zadanej wartości progowej (rysunek 4b) oraz mapę odchylenia standardowego interpolacji (rysunek 4c).

Na obszarze „Katowice” widoczne jest siedem niecek osiadań, gdzie przemieszczenia dochodzą do 59 cm (rysunek 4a). Ponadto wszystkie niecki znajdują się w obszarze, gdzie obniżenie przekroczyło wartość 0,5 cm (kolor żółty). Rysunek 4b przedstawia mapę prawdopodobieństwa przekroczenia zadanej wartości progowej. Wybór wartości uzależniono od satelity, z którego pozyskano dane PS. Dla obszaru „Katowice”, gdzie dane pochodziły z satelity pasma C, jest to wartość -2 mm. Mapę należy interpretować w następujący sposób: kolorem pomarańczowym oznaczono obszar, dla którego



Rys. 2. Obszar badawczy „Będzin”: a) zestaw danych PS ERS, b) zestaw danych PS Envisat., c) granice obszarów poddanych niewielkim pionowym przemieszczeniom terenu, wyznaczone na podstawie interpolacji Simple Kriging danych zestawu ERS oraz Envisat. Współrzędne w układzie PL-1992

Fig. 2. Research area „Będzin”: a) PS ERS data set, b) PS Envisat data set, c) boundaries of areas subjected to slight vertical displacement, determined by the Simple Kriging interpolation of ERS and Envisat data sets. Coordinates in PL-1992

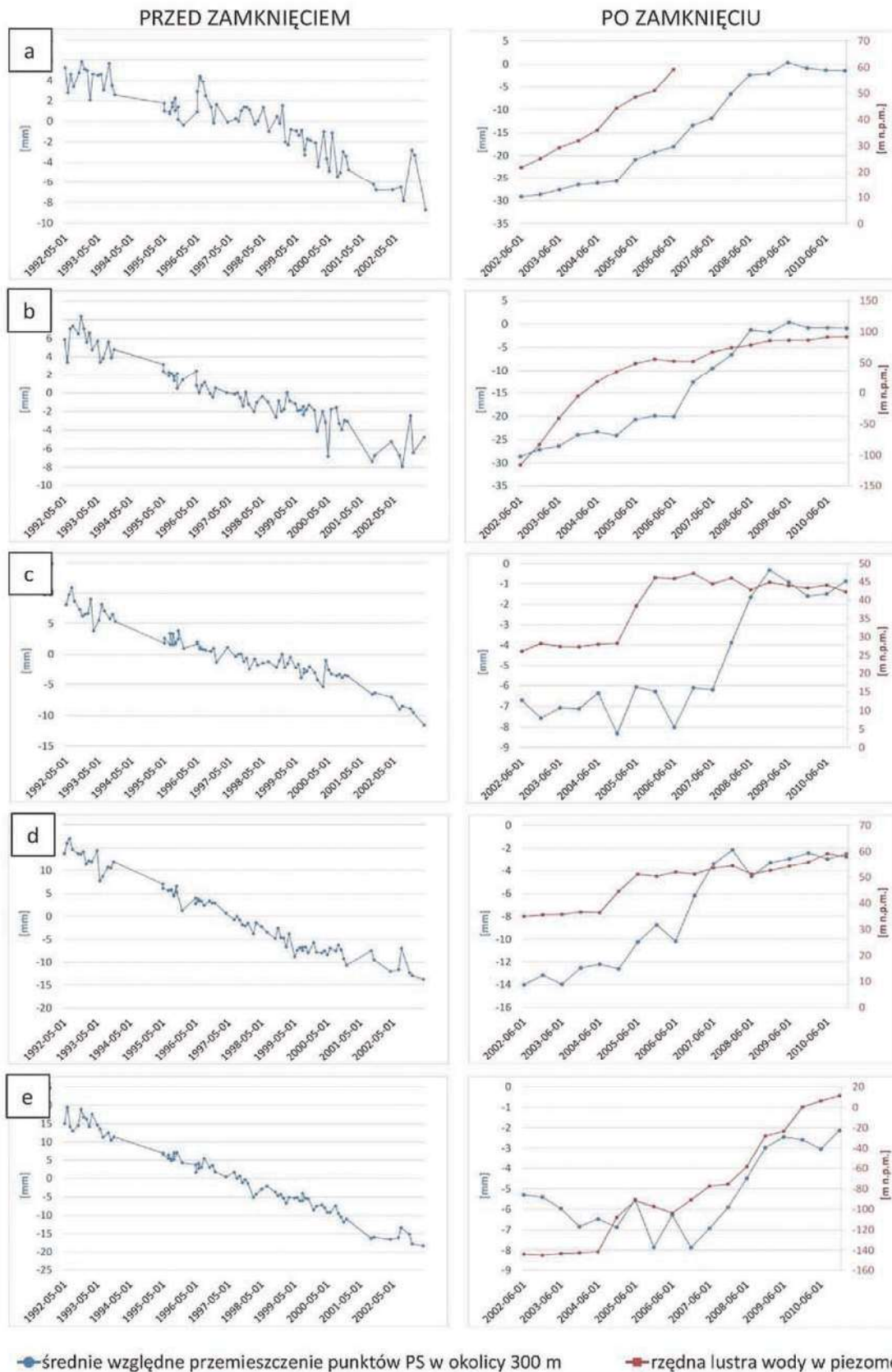
prawdopodobieństwo wystąpienia w danym okresie obniżenia większych niż wartość progowa jest większe niż 0,75. Innymi słowy, kolor biały oznacza obszar, który z prawdopodobieństwem większym niż 0,75 nie obniżył się więcej niż 2 mm (dla „Katowice”). Na podstawie rysunku 4b widać wyraźnie, iż większość badanego obszaru znajduje się pod wpływem pionowych przemieszczeń terenu. Na rysunku 4c przedstawiono odchylenie standardowe interpolacji metodą Symulacji Gaussa. Odchylenie jest niewielkie, w granicach 1 mm, na obszarze występowania punktów PS, ale osiąga znaczące wartości w rejonach głównych niecek osiadań, wyznaczonych na podstawie interferogramów. Wynika to z faktu, iż obecność znaczących wartości skupionych w pojedynczych rejonach obszarów badawczych zaburza znacząco rozkład wszystkich

punktów w zbiorach kompleksowych, przez co odbiega on od rozkładu normalnego. W miejscach tych Symulacje Gaussa są mniej wiarygodne.

6. Podsumowanie i wnioski

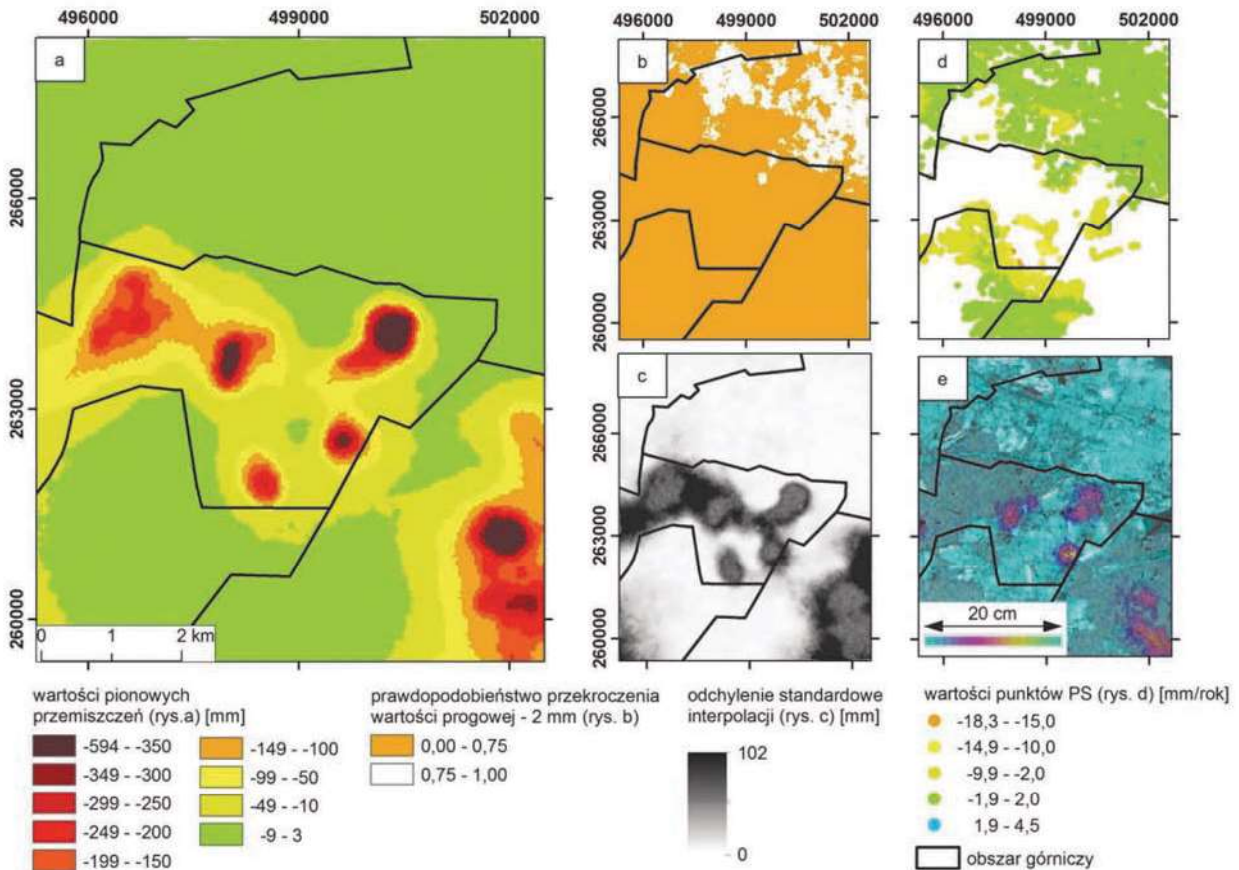
W pracy zaprezentowano wykorzystanie zestawów danych przetworzonych różnymi technikami interferometrii radarowej do analizy pionowych przemieszczeń terenu, spowodowanych podziemną działalnością górniczą. W szczególności wykazano, iż:

- Różne zestawy danych są pomocne przy identyfikacji zmian powierzchni terenu o różnym zasięgu i wielkości,



Rys. 3. Wykresy uśrednionych wartości względnych przemieszczeń dla wszystkich punktów PS oddalonych o 300 metrów od piezometrów (a) Wojkowice, (b) Grodziec II, (c) Cieszkowski, (d) Paweł i (e) Szczepan dla zestawu ERS (po lewej) oraz Envisat II (po prawej). Wykresy po prawej zawierają również odczyty rzędnych lustra wody. Lokalizacja piezometrów została przedstawiona na rysunku 2.

Fig. 3. Graphs of average relative displacement values for all PS points in 300 meters radius from piezometers (a) Wojkowice, (b) Grodziec II, (c) Cieszkowski, (d) Paweł and (e) Szczepan for ERS (left) and Envisat (right) dataset. The graphs on the right also include ground water level. The location of piezometers is shown in Figure 2.



Rys. 4. Wynikowe mapy dla obszaru „Katowice” na podstawie interpolacji Symulacjami Gaussa: a) mapa wartości pionowych przemieszczeń dla okresu 22.02.2007-27.05.2008, b) mapa prawdopodobieństwa przekroczenia wartości 2 mm, c) mapa odchylenia standardowego interpolacji, d) zestaw danych PS Envisat. Średnie wartości przemieszczenia w kierunku LOS zostały przedstawione w skali barwnej, e) przykład interferogramu różnicowego ALOS-PALSAR (okres 10.07.2007 – 25.08.2008). Zmiany powierzchni terenu widoczne są jako prążki interferometryczne, gdzie pełen cykl kolorystyczny odpowiada obniżeniu o wartości 20 cm. Współrzędne w układzie PL-1992

Fig. 4. Resulting maps for the „Katowice” research area based on the Gaussian simulation interpolation. a. Vertical displacement map for the period between 22 February 2007 and 27 May 2008. b. Map of the probability of exceeding -2 mm value. c. Map of the standard deviation of the interpolation. d. PS Envisat data set. Mean displacement velocity values in the LOS direction are shown in the color scale. e. Example of ALOS-PALSAR differential interferogram (10 July 2007 – 25 August 2008). Surface changes are visible as interferometric fringes, where the full color cycle corresponds to a subsidence of 20 cm. Coordinates in PL-1992

w zależności od długości wykorzystanej fali radarowej oraz sposobu przetwarzania.

- Punktowe dane przetworzone w technice PSInSAR posłużyły do przedstawienia obrazu niewielkich przemieszczeń zachodzących na obrzeżach tworzących się niecek obniżeniowych lub zachodzących po zaprzestaniu robót podziemnych, jak również śladowego podnoszenia terenu mającego miejsce po zamknięciu kopalni. Zidentyfikowano pionowe przemieszczenia terenu o wartościach do 2 cm na rok (na podstawie danych zakresu C) na terenie czynnej działalności górniczej.
- Porównanie wykresów czasowych danych PSInSAR na obszarze kopalni zamkniętych z odczytami rzędnej lustra wody w piezometrach wykazało, iż podnoszenie się poziomu wód podziemnych może mieć wpływ na podnoszenie terenu o wartościach dochodzących do ok. 1 cm na rok.
- Interferogramy różnicowe umożliwiły wyznaczenie dużych osiadań i identyfikację siedmiu niecek obniżeniowych na terenie Katowic, gdzie sumaryczne wartości osiadania sięgały 59 cm w okresie 15 miesięcy.

- Zaprezentowano możliwość połączenia różnych typów danych w celu otrzymania jednolitej, łatwej w interpretacji mapy przemieszczeń pionowych dla danego okresu. Połączenie dwóch typów informacji, punktowej o niewielkich przemieszczeniach oraz rastrowej o dużych przemieszczeniach, zostało przeprowadzone poprzez jednoczesną interpolację otrzymanych wartości, zarówno niewielkich, jak i dużych. Interpolacja obejmowała zastosowanie metody Simple Kriging oraz metody Symulacji Gaussa. Wynikiem analizy geostatystycznej była mapa pionowych przemieszczeń terenu, przedstawiająca pełen, prosty w odbiorze obraz zmian zaszłych w okresie luty 2007 – maj 2008 na obszarze Katowic.

Zastosowane metody geostatystyczne w znaczący sposób pomogły w interpretacji pozyskanych danych interferometrycznych. Gotowe przetworzenia nie zawierają jednoznacznej informacji o wartości przemieszczenia pionowego zaistniałego w danym okresie. Dopiero ich konwersja umożliwia szczegółową analizę zmian powierzchni terenu. Zarówno interpolacja samych punktów PS, jak i ich połączenie z danymi z inter-

ferogramów różnicowych, umożliwia wykorzystanie danych interferometrii satelitarnej do przedstawienia zasięgu szkód górniczych w przejrzysty sposób. Należy również podkreślić, iż radarowe dane satelitarne pozwalają na przeprowadzenie regionalnej analizy występowania zmian powierzchni terenu na obszarze całego GZW od 1991 roku (wystrzelenie satelity ERS-1) do chwili terażniejszej, a więc dla 25-letniego okresu.

Podziękowania

Niniejsza praca powstała przy wsparciu finansowym w ramach działalności statutowej Państwowego Instytutu Geologicznego - Państwowego Instytutu Badawczego podczas realizacji tematu nr 61.2506.1401.00.0. Przedstawione badania są wynikiem rozprawy doktorskiej autorki prowadzonej w PIG-PIB, której promotorem był prof. dr hab. Marek Graniczny. Specjalne podziękowania za pomoc w zbieraniu materiałów wyjściowych składam pracownikom KWK Wujek i Centralnego Zakładu Odwadniania Kopalń.

Literatura

- BIAŁEK J., MIELIMAKAR., CZERWIŃSKA-LUBCZYK A. 2014 - Górnictwo perspektywy i zagrożenia. BHP oraz ochrona i rekultywacja powierzchni. Wydawnictwo P.A.nova. Gliwice, s. 271.
- BORECKI M. 1980 - Ochrona powierzchni przed szkodami górniczymi. Wyd. Śląsk, Katowice, s. 967.
- BUDRYK W. 1947 - Górnictwo: obejmuje: poszukiwania złóż i ich zasoby, udostępnienie i odbudowa złóż, urabianie skał, przewietrzanie kopalni, pożary podziemne, ratownictwo i oświetlenie górnicze. Centralny Zarząd Przemysłu Węglowego, Biuro Wydawnictw Technicznych, Katowice, s. 245.
- CROSETTOM., MONSERRATO., CUEVAS-GONZÁLEZ M., DEVANTHÉRY N., CRIPPA B. 2015 - Persistent Scatterer Interferometry: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 115, s. 78-89.
- CZARNOGÓRSKA M. 2010 - Dynamika ruchów powierzchniowych Ziemi w wybranych rejonach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego na podstawie interferometrii satelitarnej (rozprawa doktorska, niepublikowana). Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa.
- FERRETTI A., MONTI-GUARNIERI A., PRATI C., ROCCA F., MASSONET D. 2007 - InSAR Principles-Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation, TM-19. ESA Publications, Holandia, A-3-38.
- FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F. 2001 - Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing, 39(1), 8-20.
- GRANICZNY M., KOWALSKI Z., JURECZKA J., CZARNOGÓRSKA M., PIĄTKOWSKA A. 2008 - Preliminary interpretation of PSI data of the northeastern part of the Upper Silesian basin (Sosnowiec test site) - TerraFirma project. Polish Geological Institute Special Papers, 24, 29-36.
- GRANICZNY M., KOWALSKI Z., PRZYLUCKA M., ZDANOWSKI A. 2014a Wykorzystanie danych SAR do obserwacji deformacji terenu spowodowanych działalnością górniczą w rejonie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego: wyniki projektu DORIS (EC-FP7). „Przeгляд Górnicy”, 70 (12), s. 11-19.
- GRANICZNY M., KOWALSKI Z., PRZYLUCKA M., ZIMMERMANN K. 2014b - Terrain motion of selected abandoned hard coal mines at the north-eastern part of the Upper Silesian Coal Basin (Southern Poland) in a view of SAR interferometric data (Surface deformation in the Upper Silesian Coal Basin). Abstract and Programme Book 34th EARSEL Symposium, Warsaw, s. 271.
- HERRERA G., TOMAS R., LOPEZ-SANCHEZ J. M., DELGADO J., MALLORQUI J.J., DUQUE S., MULAS J. 2007 - Advanced DInSAR analysis on mining area: La Union case study (Murcia, SE Spain). Engineering Geology 2007, 90, s. 148-159.
- JURECZKA J., DOPITA M., GAŁKA M., KRIEGER W., KWARCIŃSKI J., MARTINEC, P. 2005 - Atlas geologiczno-złozowy polskiej i czeskiej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego: 1: 200 000. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- KANEVSKI, M. (red.) 2013 - Advanced mapping of environmental data. John Wiley & Sons, 2013, s. 47-92.
- KNOTHE S. 1957 - Observations of surface movements under influence of mining and their theoretical interpretation. Proceedings of the European Congress on Ground Movement held at the University of Leeds, April 9-12, s. 210-218.
- KNOTHE S., LEŚNIAK J., PIEŁOK W., ROGOWSKA J. 1995 - On the relationship between deep mining intensity, dynamic factors and surface structure damages. First National Conference on Ground Control in Mining, Calcuta-India, 12-13 January 1995, Central Mining Research Institute, Directorate General of Mines Safety, s. 289-305.
- KONOPKO W. 2010 - Wydobywanie węgla i destrukcja górotworu w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. „Przeгляд Górnicy”, 11 (66), s. 1-10.
- KOWALSKI A. 2015 - Deformacje powierzchni w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. Monografia. Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice, s. 283.
- KWIATEK, J. 1997 - Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych. GiG, Katowice 1997, s. 726.
- KWK Wujek, <http://www.wujek.pl/>, dostęp 09-2016.
- MATHERON G. 1963 - Principles of geostatistics. Economic Geology, vol. 58, s. 1246-1266.
- MIDAS, <http://geoportal.pgi.gov.pl/portal/page/portal/MIDASGIS/start>, dostęp 012016.
- PERSKI Z. 1998 - Applicability of ERS-1 and ERS-2 InSAR for land subsidence monitoring in the Silesian coal mining region, Poland. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 32, s. 555-558.
- POPIOLEK E. 2009 - Ochrona terenów górniczych. Wydawnictwa AGH, Kraków, s. 298.
- POPIOLEK E., MARCAK H., KRAWCZYK A. 2006 - Możliwości wykorzystania satelitarnej interferometrii radarowej InSAR w monitorowaniu zagrożeń górniczych. WUG: Bezpieczeństwo pracy i ochrona środowiska w górnictwie, 6, s. 16-18.
- PRZYLUCKA M., GRANICZNY M., KOWALSKI Z. 2015a - Identification and Changes of Subsidence Basins Caused by Coal Mining Activity in Upper Silesia Using Satellite Interferometric Data. Proceedings of FRINGE'15: Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop 2015, Frascati, Italy, 23-27 March 2015, ESA Publication SP-731. doi:10.5270/Fringe. s. 51.
- PRZYLUCKA M., GRANICZNY M. 2015 - Kompleksowe wykorzystanie przetworzeń DInSAR i PSInSAR w badaniu pionowych przemieszczeń terenu w wybranych rejonach GOP. „Przeгляд Górnicy”, 71(3), s. 80-88.
- PRZYLUCKA M., HERRERA G., GRANICZNY M., COLOMBO D., BÉJAR-PIZARRO M. 2015b - Combination of Conventional and Advanced DInSAR to Monitor Very Fast Mining Subsidence with TerraSAR-X Data: Bytom City (Poland). Remote Sensing, 7(5), s. 5300-5328.
- SANABRIA M.P., GUARDIOLA-ALBERT C., TOMÁS R., HERRERA G., PRIETO A., SÁNCHEZ H., TESSITORE S. 2014 - Subsidence activity maps derived from DInSAR data: Orihuela case study. Natural Hazards and Earth System Sciences, 14(5), s. 1341-1360.
- SOPATA P. 2013 - Wykorzystanie satelitarnej interferometrii radarowej InSAR w badaniach i prognozowaniu pogórnicych zmian powierzchni terenu: monografia. Wydawnictwa AGH, Kraków.
- STRZAŁKOWSKI P. 2010 - Forecasts of mine-induced land deformations in consideration of the variability of the parameter describing the process kinematics. Archives of Mining Sciences, 55(4), s. 865-872.
- STRZELCZYK J., PORZYCKA S., LEŚNIAK A. 2009 - Analysis of ground deformations based on parallel geostatistical computations of PSInSAR data. Proceedings of 17th International Conference on Geoinformatics 2009, IEEE, 6.
- WEGMULLER U., WERNER C., STROZZI T., WIESMANN A. 2004 - Monitoring mining induced surface deformation. Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '04, Proceedings, IEEE International (Vol. 3), s. 1933 – 1935.

Artykuł wpłynął do redakcji – marzec 2017
Artykuł akceptowano do druku 5.04.2017