

ZASTOSOWANIE SATELITARNEJ INTERFEROMETRII RADAROWEJ DO IDENTYFIKACJI MOBILNOŚCI FORM SOLNYCH CENTRALNEJ POLSKI NA PRZYKŁADZIE WYSADU SOLNEGO INOWROCŁAW

APPLICATION OF THE SAR INTERFEROMETRIC METHODS TO IDENTIFY THE MOBILITY OF THE SALT STRUCTURES IN CENTRAL POLAND ON THE EXAMPLE OF THE SALT DIAPIR IN INOWROCŁAW

ANNA PIĄTKOWSKA¹, MARIA SURAŁA¹, ZBIGNIEW PERSKI², MAREK GRANICZNY¹

Abstrakt. Wysad solny Inowrocław jest typową formą geologiczną dla regionu Wysoczyzny Kujawskiej, znajdującej się w centralnej Polsce. W ujęciu regionalnym obszar wysadu solnego Inowrocławia jest genetycznie związany z tektoniką blokową podłoża kompleksu permńskiego, która była jednym z ważniejszych czynników inicjujących i warunkujących dźwiganie się antyklin solnych ku górze. Strefy tektoniczne, zakorzenione w głębokim podłożu, kontynuują się ku warstwom przypowierzchniowym, wykazując do dziś aktywność tektoniczną. Aktywność ta wpływa na zachowanie się terenu bezpośrednio w otoczeniu wysadu solnego Inowrocław. W zaprezentowanych badaniach wykorzystano dane pozyskane w technice *persistent scatterer interferometry* (PSI), w celu zbadania zależności pomiędzy pionowymi ruchami terenu a wykształceniem strukturalno-geologicznym wysadu solnego oraz wykształceniem powierzchni morfologicznej podłoża osadów czwartorzęd. Badania były prowadzone w wymiarze lokalnym (wysad solny Inowrocław) oraz regionalnym (fragmenty antyklin solnych Inowrocławia, Gopła, Barcina i Góry). Stwierdzono proste zależności pomiędzy ukształtowaniem powierzchni terenu i podłoża czwartorzęd a mapą przedstawiającą rozkład wartości ruchów pionowych. Przypuszcza się, iż mechanizm mobilności terenu nad wysadem solnym Inowrocław związany jest ze współczesną aktywnością halotektoniczną, a za wypiętrzanie lub osiadanie terenu odpowiedzialnych jest wiele różnych czynników. Są to między innymi: litologia (np. reakcja czapy gipsowej z wodami podziemnymi różnych poziomów, powodująca zwiększenie objętości skały lub, przez utratę wilgoci, osiadanie kompleksu gipsowego), tektonika (uskoki, tektonika solna), wpływ eksploatacji górniczej oraz zmiany poziomu wód gruntowych.

Przybliżone wartości przemieszczeń terenu w rejonie wysadu solnego i w rejonie pobliskich struktur solnych określają wyniki badań interferometrii satelitarnej PSI. Wyznaczenie stref aktywnych tektonicznie dzięki przeprowadzonej szczegółowej analizie geologiczno-strukturalnej pozwoliło określić charakter stwierdzonych ruchów. W procesie podnoszenia i osiadania terenu dopatrzono się również związków z naturalnymi, współczesnymi procesami halotektoniki. Zaprezentowane wyniki badań pokazują wagę i potencjał wykorzystania metody PSI oraz technik satelitarnej interferometrii radarowej do badania ruchów masowych w rejonie struktur solnych.

Słowa kluczowe: interferometria satelitarna, struktury solne, wysad Inowrocław.

Abstract. The presence of salt structures in the Inowrocław area of the Kujawy region constitutes the geological setting, which is typical for lowlands of Central Poland. In the regional aspect salt structure in the Inowrocław area is genetically connected with block tectonic of the subsurface of Permian complex. It was one of the most important factor initiating uplift of the salt anticlines. Tectonic zones, rooted in the deep substratum show activity till the present times. This activity influences at the configuration of the terrain surface in the vicinity of the Inowrocław salt diapir. Persistent scatterer interferometry (PSI) method was applied for studying relationships between vertical movements of the earth surface and structural – geological development of the Inowrocław diapir as well as morphological surface of Quaternary substratum. These investigations were carried out in the local scale (around Inowrocław salt diapir) and regional (fragments

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; e-mail: anna.piatkowska@pig.gov.pl; marek.graniczny@pigi.gov.pl; maria.surala@pigi.gov.pl

² Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Karpacki, ul. Skrzatów 1, 31-560 Kraków; e-mail: zbigniew.perski@pigi.gov.pl

of the salt anticlines of Inowrocław, Gopło, Barcin and Góra). Simple relationships were confirmed between shape of the terrain relief and Quaternary substratum and map of the distribution of the vertical movements. It is assumed that mechanism of the terrain mobility above Inowrocław salt diapir is connected with contemporary halotectonic activity. However, for the uplift and subsidence of this area are responsible many other factors. There are as follow: lithology (reactions between gypsum cap and groundwater of different horizons, leading to increase of rock volume or lose of moisture content of the gypsum complex, and finally – subsidence), tectonics (faults and halotectonic phenomena), impact of mining exploitation and changes of groundwater levels.

Results of analysis of PSI data show approximate values of ground movements in this area. Active tectonic zones determined during detailed geological – structural analysis enabled to better understanding of the character of ground movements. The relationship between ground movements and contemporary halotectonic phenomena was observed, too. Presented data show big potential of the PSI radar satellite methodology for investigation and analysis of ground movements at the areas of salt structures.

Key words: satellite interferometry, salt structures, Inowrocław salt diapir.

PRZEDMIOT BADAŃ

Przedmiotem badań jest próba implementacji metody teledetekcyjnej opartej na analizach danych pozyskanych z radarowych obrazów satelitarnych i zastosowanie metody interferometrii satelitarnej do oszacowania ruchów powierzchni terenu nad formami solnymi. Badania interferometryczne, wraz z wnikliwą analizą przestrzenną budowy geologiczno-strukturalnej (tektonika i litologia na przykładzie wysadu Inowrocław) i prześledzeniem informacji geologiczno-złożowych, pozwalają na scharakteryzowanie ruchu (naturalny lub indukowany) i określenie przybliżonej jego wielkości. Analizowana struktura geologiczna wysadu solnego Inowrocławia została potraktowana jako klucz interpretacyjny dla form solnych występujących na terenie Kujaw (fig. 1).

Zastosowanie metody interferometrii satelitarnej jest warunkowane istnieniem stałych, naturalnych, stabilnych punktów odbicia, tzw. *persistent scatterers* (PS), znanych również w literaturze polskiej pod nazwą stabilne naturalne reflektory lub stałe rozpraszacze (Graniczny, 1989; Perski i in., 2008; Graniczny i in., 2011; Piątkowska i in., 2011). W tym przypadku zabudowania miasta Inowrocławia stwarzają wyjątkową sytuację istnienia stabilnych rozpraszaczy – PS-ów, bezpośrednio ponad kopułą wysadu solnego Inowrocławia. Atutem metody interferometrii satelitarnej, w stosunku do badań geodezji naziemnej, jest objęcie badaniem dużego obszaru, a przestrzenna gęstość danych pomiarowych znacznie ułatwia interpretację i interpolację wyników.

Rejon wysadu Inowrocławia jest obszarem poeksploatacyjnym, dlatego przy wyjaśnianiu przyczyn mobilności terenu uwzględnia się naturalne procesy ruchu wynoszenia kopuły solnej w kontekście zjawisk odprężeniowych w górotworze, związanych z kopalnictwem solnym.

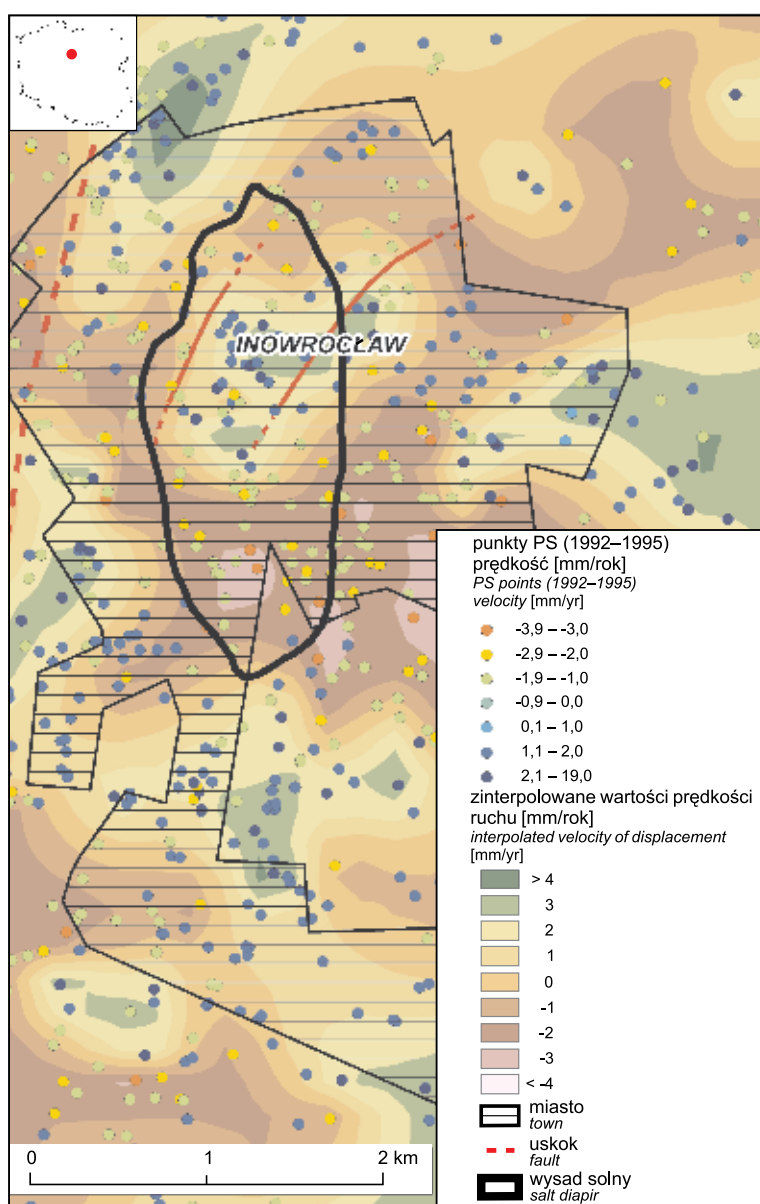


Fig. 1. Wybrane punkty PS na tle przybliżonej mapy trendów ruchów pionowych

Selected PS points on the background of conceptual map of trends of vertical movements

SZKIC BUDOWY GEOLOGICZNEJ

Wysad solny Inowrocławia jest formą w pełni wykształconego diapiru solnego, dochodzącego do powierzchni terenu. Kopuła wysadu solnego znajduje się bezpośrednio pod zabudowaniami miasta Inowrocławia. Złoże soli było eksploatowane z przerwami od 1875 roku do 1991. Ponad stuletnia (123 lata) działalność eksploatacyjna na wysadowym złożu Inowrocław, spowodowała zmianę naturalnych naprężeń panujących w górotworze oraz zaburzyła stosunki wodne.

Naturalne procesy tektoniczne w ujęciu regionalnym związane są z tektoniką blokową stwierdzoną w starszym podłożu kompleksu permiego. Tektonika blokowa była jednym z ważniejszych czynników inicjujących i warunkujących dźwiganie się antyklin solnych ku górze (Dadlez, Marek, 1974; Dadlez, 1980; Marek, Pajchłowa, 1997; Dadlez i in., 2000). W przypadku Inowrocławia naturalny proces dźwigania kopuły wysadu odbywał się z różnym stopniem nasilenia w funkcji czasu. Skutkiem tego naturalnego procesu jest powolna aktywność stref tektonicznych, które kontynuując się z głębszego podłoża ku warstwom przypowierzchniowym, ulegają odmłodzeniu. Przy identyfikacji tych stref pomocna jest analiza teledetekcyjna dla wyznaczenia liniowych elementów strukturalnych, które mogą wskazywać na współczesną aktywność stref tektonicznych

w rejonie Inowrocławia. (Piątkowska, 1989; Piątkowska, 2003; Piątkowska, 2007).

Czynniki powodujące mobilność terenu w obrębie wysadu solnego i jego otoczenia są zwykle bardzo złożone. Należy przyjąć, że za wypiętrzanie lub osiadanie terenu odpowiedzialnych jest wiele różnych czynników. Są to między innymi:

- litologia (np. reakcja skał gipsowych z wodami podziemnymi, powodująca zwiększenie objętości skały lub utratę wilgoci i osiadanie kompleksu gipsowego);
- właściwości plastyczne kompleksu solnego (zjawisko „płynięcia” w obrębie osadów solonośnych);
- skomplikowana budowa wewnętrzna wysadu solnego (silnie sfałdowane poziomy solonośne) (Tarka, 1992);
- ciężar nadkładu powodujący redukcję miąższości kompleksów solonośnych pod wpływem nacisku;
- stan naprężeń regionalnych w otoczeniu wysadu;
- odnawianie starych założeń tektonicznych, a w szczególności halotektonika;
- zmiany poziomu wód gruntowych i zakłócenie stosunków wodnych w obrębie starych wyrobisk;
- zmiany układu naprężeń, lokalnie w rejonie wyrobisk.

DANE INTERFEROMETRYCZNE

W celu wykazania wpływu geologicznych form solnych na powolne ruchy pionowe powierzchni terenu wykorzystano dane teledetekcyjne uzyskane metodą interferometrii radarowej (InSAR). Dane te zostały zanalizowane w kontekście zgromadzonej dokumentacji geologicznej i tektonicznej. Metody satelitarnej interferometrii radarowej bazują na obrazowaniach satelitarnych rejestrowanych w paśmie fal radarowych przy użyciu technologii SAR (*synthetic aperture radar*). Obecnie wykorzystuje się dwie metody pomiaru deformacji terenu – interferogramów różnicowych oraz rozpraszaczy stabilnych (PSI). Pierwsza z nich polega na tworzeniu interferogramów, czyli obrazów ilustrujących różnicę faz fali odbitej pomiędzy dwoma obrazowaniami tego samego terenu, zarejestrowanymi w różnym czasie. Prawidłowy obraz interferogramu, ilustrujący deformacje powierzchni badanego terenu, uzależniony jest od wielu czynników i narażony jest na błędy spowodowane między innymi zawartością pary wodnej w atmosferze, błędami wyznaczania orbit oraz zmianą pokrycia terenu (np. wzrost roślinności). Przy niedostatecznej korelacji dwóch obrazów następuje utrata koherencji, uniemożliwiająca stworzenie wiarygodnego interferogramu. Metoda ta jest wykorzystywana w badaniach dużych deformacji gruntu (np. na terenach wydobywania węgla, przy trzęsieniach ziemi) (np. Popiołek i in., 2002; Perski, Hanssen, 2005; Krawczyk i in., 2007; Perski, 2010, Huanyin i in., 2011).

Druga metoda – *persistent scatterer interferometry* (PSI) opiera się na identyfikacji pikseli reprezentujących tzw. stabilne rozpraszacze. Do jej wykorzystania potrzebny jest

zestaw scen tego samego terenu, pozyskanych z tej samej orbity tym samym satelitą (a więc w czasie reemisji obrazowania). Zestaw powinien zawierać powyżej 20 scen, co przy czasie reemisji 35 dni (dla satelity ERS) oznacza zbiór danych obejmujący okres kilku lat. Polega ona na tworzeniu zestawów interferogramów, na których następnie identyfikowane są punkty PS – biorąc pod uwagę koherencję (Hooper, 2008) lub amplitudę (Ferretti i in., 2001). Do dalszych analiz kwalifikowane są tylko te punkty, które charakteryzują się stabilnym rozpraszaniem fali, w praktyce są to dachy budynków, słupy, wychodnie skalne, elementy infrastruktury naziemnej (Perski, Mróz, 2007). W wyniku przetwarzania danych, każdemu punktowi przypisywana jest wartość prędkości przemieszczenia w kierunku obrazowania satelity (*line of sight*) w milimetrach na rok. Należy zaznaczyć, że jest to wartość względna, mierzona przy obraniu jednego lub kilku punktów referencyjnych, uznanych za stabilne (Wasowski i in., 2005; Perski, Mróz, 2007; Kühn, 2011; Refice i in., 2011). Ponadto każdemu punktowi przypisywana jest tabela wartości względnego przemieszczenia dla każdej sceny z wykorzystanego zbioru, w odniesieniu do jednej sceny referencyjnej. Umożliwia to stworzenie wykresu zmian przemieszczenia w czasie, tzw. szeregu czasowego (*time series*). Metoda PSI, w przeciwieństwie do metody interferogramów różnicowych, pozwala na badanie wartości przemieszczeń niewielkich i powolnych (w przypadku satelity ERS są to przemieszczenia nie większe niż kilka centymetrów na rok).

W prezentowanych badaniach wykorzystano wyniki przetworzenia scen SAR z satelitów ERS-1/2, techniką PSI oraz SBAS (Lanari, 2003), zaimplementowanych w naukowym oprogramowaniu StaMPS (Hooper, 2008). Dane zostały opracowane przez Perskiego i Wojciechowskiego w ramach projektu pt. „Zastosowanie satelitarnej interferometrii radarowej do identyfikacji mobilności terenu nad wysadem solnym (rejon Inowrocławia)”, finansowanego ze środków przeznaczonych na działalność statutową PIG-PIB. Opraco-

wanie zawiera 31 wybranych scen z lat 1992–2007, na podstawie których zidentyfikowano 31 773 punkty PS. Obszar opracowania obejmuje około 1600 km², pomiędzy Gniewkowem i Mogilnem.

Otrzymany zbiór punktów PS charakteryzuje się rozkładem normalnym, ze średnią wartością prędkości przemieszczenia 0,0 mm/rok, przy czym maksymalna i minimalna wartość to odpowiednio +19,0 oraz -11,6 mm/rok, a 90% punktów mieści się w przedziale -5 do +5 mm/rok.

WYNIKI BADAŃ

Badania budowy geologiczno-strukturalnej form solnych w kontekście obserwacji mobilności terenu wykonane na bazie przetworzeń radarowych zdjęć satelitarnych ERS 1 i 2 obejmują lata 1996–1999. Analizy przeprowadzono w wymiarze lokalnym – wysad Inowrocław i regionalnym – fragmenty antyklin solnych Inowrocławia, Gopła, Barcina i Góry.

Z przedstawionych informacji interferometrycznych o rozkładzie wartości punktów PS dla wysadu solnego Inowrocławia wynika, że jego centralna część wykazuje tendencje do wynoszenia (fig. 2), z naciskiem na ruch pulsacyjny widoczny na wykresie *time series*. Na powolny ruch wypiętrzający wskazują również punkty PS rozlokowane w rejonach Starego Miasta Inowrocławia, osiedla Rąbin, Nowego Osiedla oraz ulicy Składowej i są to wartości od 0 do +8 mm/rok. Powolny ruch wypiętrzania mas solnych wysadu świadczy o naturalnym procesie zjawisk podporządkowanych prawom halotektoniki (Seni, Jackson, 1983; Hardy, Langer, 1984). Należy podkreślić, że istnieje wyraźny związek pomiędzy wartością ruchów pionowych a zmiennością wykształcenia litologicznego czapy gipsowej oraz jej miąższością.

Próby sklasyfikowania charakteru ruchów pod kątem genezy związanej ze zjawiskami naturalnymi a zjawiskami indukowanymi, prowadzą do konkluzji, że oba te czynniki naturalny i indukowany, w przypadku wysadu solnego Inowrocławia przenikają się wzajemnie, z różnym nasileniem. Podobne obserwacje poczyniono w wymiarze regionalnym, analizując obszary antyklin: Barcina (na zachód od Pakości), Góry, Gopła (na południe od Kruszwicy) i Inowrocławia. Obserwacje i dokładna analiza wysadu Inowrocławia zostały wykorzystane jako klucz interpre-

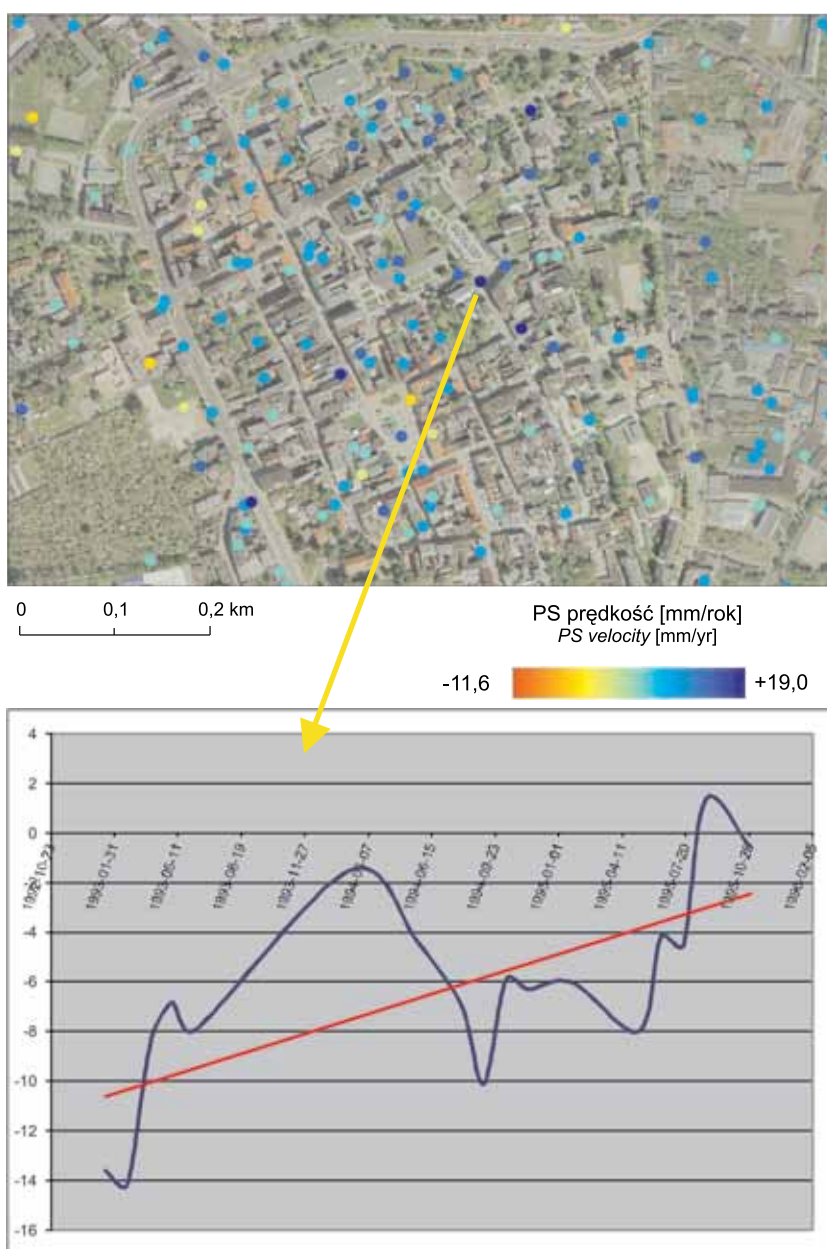


Fig. 2. Rozkład punktów PS w rejonie Starego Miasta w Inowrocławiu; tendencja wynoszenia średnio 3mm/r.

The distribution of PS points of Inowrocław Old Town; tendency uplift average elevation of 3 mm/y.

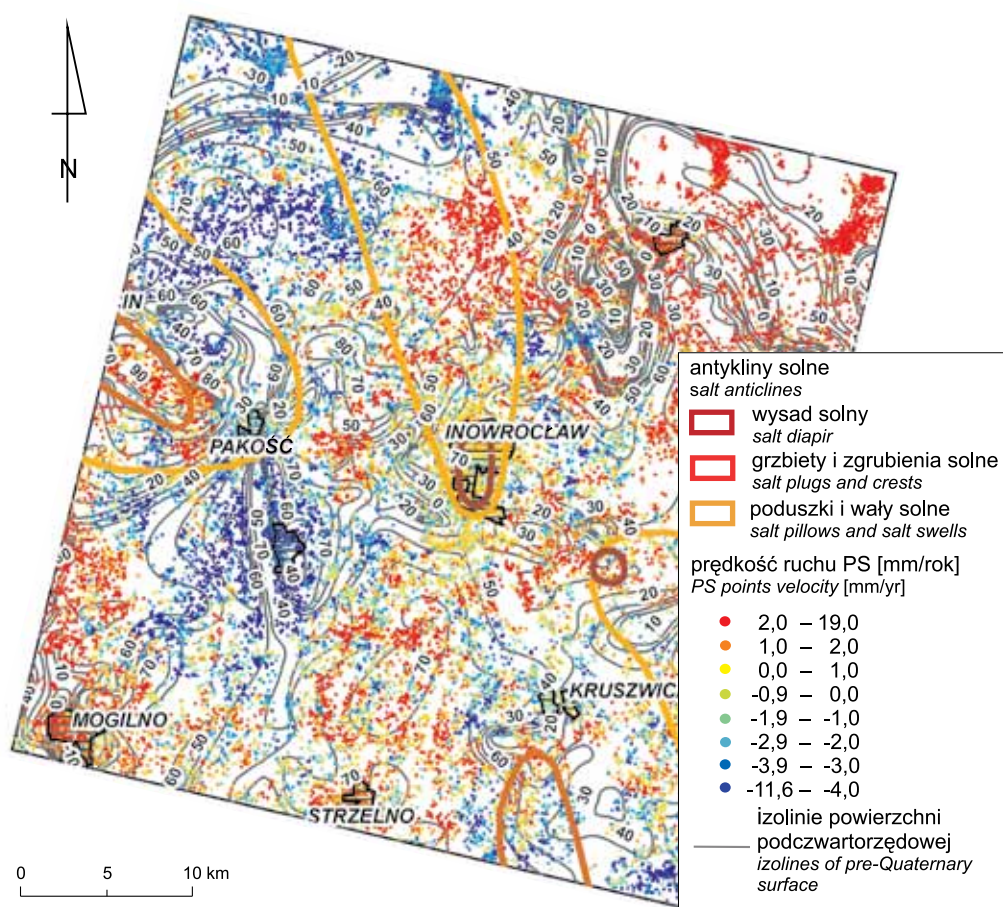


Fig. 3. Zestawienie punktów PS na tle izolinowej interpretacji podłoża czwartorzędu wraz z orientacyjnym zarysem form solnych (według Dadleza, 1980)

Summary of PS points against the isolines of pre-Quaternary surface and indicative outline of the salt forms (after Dadlez, 1980)

tacyjny i wskazówka do oceny zależności pomiędzy właściwościami kinematycznymi kompleksów solnych a wpływem na dynamikę powierzchni terenu w rejonie wymienionych struktur solnych. Stwierdzono również wyraźną zależność pomiędzy wykształceniem powierzchni morfologicznej podłoża osadów czwartorzędu a ruchami wznoszącymi i obniżającymi. Zarejestrowane dane interferometryczne przedstawione w formie mapy cieniowanej (punkty PS z wygenerowanymi wartościami), obejmują powierzchnię 1/4 całej sceny satelitarnej ERS 1/2 (fig. 3). Dodatkowo wykonany przekrój ilustruje stwierdzoną zależność – wyniesieniom morfologicznym w podłożu czwartorzędu odpowiadają wartości dodatnie punktów PS (wypiętrzanie).

Kinematyczny mechanizm zachowania się kompleksów solnych w obrębie jednej formy, wyraźnie przekłada się na wymiar regionalny. Rozkład punktów PS przedstawiony został względem powierzchni podczwartorzędowej, zinterpolowanej w formie izolinii na bazie szkiców przedstawionych przez Listkowską (1991), Wrotka (1993), Jeziorskiego (1995) i Brzezińskiego (2009). Na figurze 3 wyniesienia w podłożu czwartorzędu odpowiadają formom solnym i od-

powiednio, miejsca te na powierzchni terenu ponad wyniesieniami w podłożu, wykazują tendencję do wynoszenia. Przykładem zgodności wyników przetworzeń interferometrycznych ze zjawiskiem współczesnego wypiętrzania, jest forma antyklinalna Barcina, znajdująca się na zachód od miejscowości Pakość. Dodatkowym elementem wpływającym na mobilność terenu jest intensywna, i na dużą skalę (powierzchniowo i w głębinie), eksploatacja odkrywkowa kopalnia wapieni jurajskich w Gminie Barcin w Bielawach. Eksploatacja bez wątpienia wpływa na charakter odprężeniowy górotworu w obrębie struktury, potęgując efekt wynoszenia (Piątkowska, 2003).

Analizując obszary występowania form solnych należy wspomnieć o nieckach kompensacyjnych, związanych z „odpływaniem” mas solnych z otoczenia wynoszonego ciała solnego do jego centrum. Zjawisko to ma również swoje odzwierciedlenie w ruchu powierzchni terenu (Baraniecka, 1975, 1980). Osiadanie powierzchni terenu udokumentowane punktami PS wykazuje wyjątkową zgodność z nieckami kompensacyjnymi w bezpośrednim otoczeniu wysadów solnych.

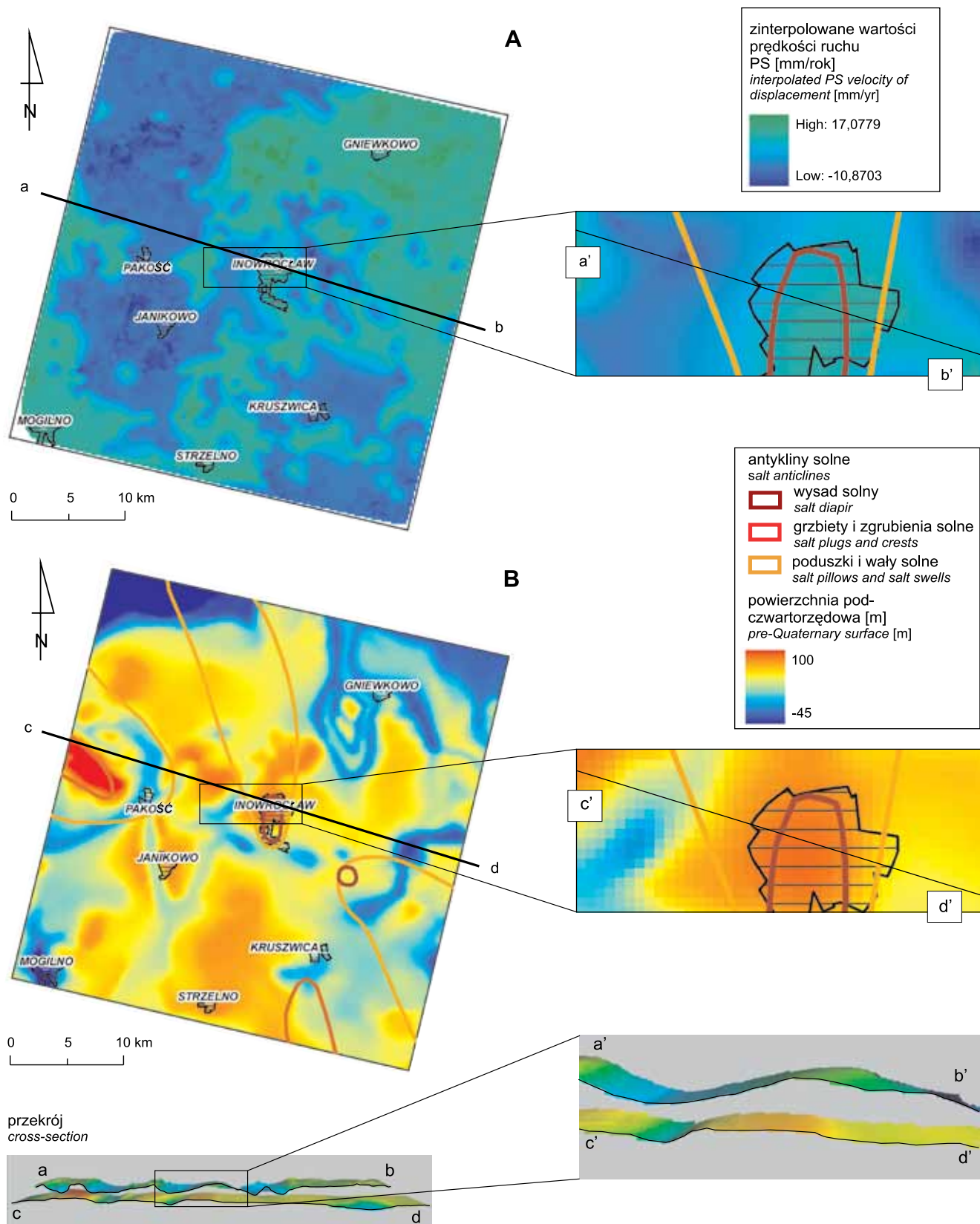


Fig. 4. Zależność pomiędzy powierzchnią przedstawiającą zinterpolowane wartości prędkości ruchu PS (A) a ukształtowaniem powierzchni morfologicznej podczwartorzędowej (B); przekroje a–b i c–d dla całej sceny satelitarnej, a'–b' i c'–d' dla struktury solnej Inowrocławia

Connection between the surface representing interpolated PS velocity values (A) and morphological pre-Quaternary surface (B); the sections a–b and c–d for the entire satellite scene, a'–b' and c'–d' for the salt structure of Inowrocław

Na mapach interpolacyjnych (fig. 4) przedstawiono interpretację morfologii powierzchni podczwartorzędowej w porównaniu z interpolowanymi wartościami prędkości przemieszczeń punktów PS na powierzchni terenu. Figura jest graficznym wyrażeniem zależności pomiędzy morfologią powierzchni podczwartorzędowej a zarejestrowanymi ruchami pionowymi powierzchni terenu na przykładzie wybranego przekroju. Na przekrojach część górna jest powierzchnią

przedstawiającą zinterpolowane wartości prędkości ruchu PS, a dolna jest powierzchnią morfologiczną (podczwartorzędową). Na figurze 4 widoczna jest korelacja pomiędzy podnoszeniem się terenu a wypiętrzeniem powierzchni podczwartorzędowej oraz pomiędzy osiadaniami terenu i obniżeniami powierzchni podczwartorzędowej. Zależności takie są tym bardziej ściśle, im dokładniejsze jest rozpoznanie podłoża czwartorzędu wierceniami i pracami geofizycznymi.

WNIOSKI

Wyniki badań oszacowania mobilności terenu w rejonach występowania struktur solnych na Niziu Polskim, z wykorzystaniem techniki interferometrii satelitarnej PSI, wykazały znaczący potencjał metody teledetekcyjnej w rozpoznaniu ruchów powierzchni terenu. Metoda ta może być wykorzystana zarówno w odniesieniu do badań lokalnych (na przykładzie wysadu Inowrocław), jak i w wymiarze regionalnym:

1. Dla wysadu Inowrocław stwierdzono współzależność przenikania się ruchów powierzchni terenu o charakterze naturalnym i indukowanym, a wyniki wskazują, że procesy naturalne prowadzą do powolnego wynoszenia, indukowane natomiast głównie do osiadania;

2. Oszacowano wartości współczesnej, naturalnej mobilności form solnych, na podstawie obserwacji z satelitów ERS 1 i 2 oraz ENVISAT, z wykorzystaniem techniki interfe-

rometrii satelitarnej. Maksymalnie wynoszenie do +19 mm/rok i osiadanie minimalnie do -11 mm/rok (fig. 3);

3. Podjęto próbę oryginalnego przedstawienia ogólnej zależności modelu interpolacyjnego wartości przemieszczeń punktów PS w stosunku do konfiguracji podłoża czwartorzędu – wyniesienie w podłożu odpowiada wynoszeniu, co dowodzi ruchów neotektonicznych, a lekkie kopułowe wyniesienie powierzchni terenu świadczy o ruchach współczesnych (fig. 4). Jest to dowód na istnienie współczesnych ruchów terenu.

W artykule przedstawiono metodykę szacowania wartości ruchu wysadu solnego Inowrocław i odpowiednio dla szacowania wartości ruchu struktur solnych w wymiarze regionalnym. Wyniki wykorzystane mogą być w planowaniu inwestycji infrastrukturalnych związanych z formami solnymi, na przykład przechowywania węglowodorów i sekwestracji dwutlenku węgla.

LITERATURA

- BARANIECKA D.M., 1975 — Zależności wykształcenia osadów czwartorzędowych od struktur i dynamiki podłoża w środkowej części Niziu Polskiego. *Z badań czwartorzędu w Polsce. Biul. Inst. Geol.*, **288**, 16: 5–97.
- BARANIECKA D.M., 1980 — Geneza elementów wklęsłych powierzchni podłoża czwartorzędu na obszarze wału kujawskiego i niecki warszawskiej. *Biul. Inst. Geol.*, **322**, 24: 31–64.
- BRZEZIŃSKI M., 2009 — Objąsnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski 1:50 000, arkusz Inowrocław. Centr. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- DADLEZ R., 1980 — Mapa tektoniczna cechsztyńsko-mezozoicznego kompleksu strukturalnego na Niziu Polskim w skali 1:500 000. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- DADLEZ R., MAREK S. 1974 — Budowa geologiczna Polski. Tektonika: 280–304. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- MAREK S., PAJCHŁOWA M., 1997 — Epikontynentalny perm i mezozoik w Polsce. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **153**.
- DADLEZ R., MAREK S., POKORSKI J., 2000 — Mapa geologiczna Polski bez utworów kenozoiku, 1:1 000 000. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- 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., 1989 — Fotolineamenty i ich znaczenie geologiczne. *Instr. Met. Bad. Geol.*, **50**.
- GRANICZNY M., BOVENGA F., KOWALSKI Z., PERSKI Z., PIĄTKOWSKA A., SURALA M., UŚCINOWICZ S., WASOWSKI J., ZDANOWSKI A., 2011 — Problematyka wykorzystania interferometrii satelitarnej w badaniach geologicznych. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **446**: 53–64.
- HARDY H.R., Jr. LANGER M., 1984 — The mechanical behavior of salt. Trans Tech Publications. Proceedings of the First Conference sponsored by the Pennsylvania State University, Rock Mechanics Laboratory.
- HOOPER A., 2008 — A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophys. Res. Letters*, **35**, L16302.
- HUANYIN Y., GUANG L., PERSKI Z., HUADONG G., 2011 — Satellite radar reveals land subsidence over coal mines: 3 ss. SPIE Newsroom.
- JEZIORSKI J., 1995 — Objąsnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski 1:50 000, arkusz Gniewkowo. Centr. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- KRAWCZYK A., PERSKI Z., HANSEN R., 2007 — Application of ASAR interferometry for motorway deformation monitoring. ESA ENVISAT Symposium, Montreux, Switzerland, 23–27 April 2007.
- KÜHN F., 2011 — Ground motion detection using persistent scatterer interferometry – Berlin case study. TerraFirma User Workshop, Essen, March 22, 2011.

- LANARI R., 2003 — Small baseline DIFSAR techniques for earth surface deformation analysis. Third International Workshop on ERS SAR Interferometry, 'FRINGE 03', Frascati, Italy, 1–5 Dec 2003.
- LISTKOWSKA H., 1991 — Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski 1:50 000, arkusz Pakość. Centr. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- PERSKI Z., MRÓZ M., 2007 — Zastosowanie metod interferometrii radarowej InSAR do badania naturalnych ruchów powierzchni terenu w Polsce. Projekt Geo-In-SAR, application of SAR interferometric (InSAR) methods for the study of natural earth surface displacements in Poland. Geo-In-SAR Project. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, **17b**: 613–624.
- PERSKI Z., KRAWCZYK A., MARINKOVIC P., 2008 — Satelitarna interferometria radarowa (InSAR) wysokiej rozdzielczości z wykorzystaniem danych TerraSAR-X. *W: XVI Ogólnopolskie Sympozjum Naukowe „Geoinformacja obrazowa w świetle aktualnych potrzeb”*, Międzyzdroje 15–17 października 2008.
- PERSKI Z., HANSEN R., 2005 — The interpretation of bam fault kinematics using Envisat SAR interferometric data. Proceedings of FRINGE 05 workshop, Frascati Italy, 28 Nov – 02 Dec 2005, ESA SP-610 CD-ROM.
- PERSKI Z., 2010 — Kompleksowa analiza interferogramów. *W: Geneza i charakterystyka zagrożenia sejsmicznego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym* (red. W.M. Zuberek, K. Jochymczyk): 41–45. Wyd. U. Śl., Katowice.
- PIĄTKOWSKA A., 1989 — Analizy fotogeologiczna rejonu Kujaw. Centr. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- PIĄTKOWSKA A., 2003 — Cechsztyńsko-mezozoiczny kompleks strukturalny Kujaw w świetle cyfrowej analizy danych teledetekcyjnych. *Instr. Met. Bad. Geol.*, **57**: 1–59.
- PIĄTKOWSKA A., 2007 — Remote Sensing methods for morpho-tectonic analysis of salt structures. *Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften. Heft 53 Geo-Pomerania Szczecin. Geology cross-bordering the Western and Eastern European Platform. Joint Meeting DGG-PTG*.
- PIĄTKOWSKA A., GRANICZNY M., SURALA M., PERSKI Z., 2011 — Application of SAR interferometric methods to identify the mobility of the area above salt diapir in Inowrocław City, Kujawy region (Poland). Abstract – FRINGE 2011, Workshop 19–23 September 2011 (ESA-ESRIN) Frascati, Rome.
- POPIOLEK E., HEJMANOWSKI R., KRAWCZYK A., PERSKI Z., 2002 — Application of Satellite Radar Interferometry to the examination of the areas of mining exploitation. *Surface Mining Braunkohle & Other Minerals*, **54**, 1: 74–82.
- REFICE A., BOVENGA F., PASQUARELLO G., DENORA D., DOLORES FIDELIBUS M., SPILOTRO G., 2011 — Bulging of the salt dome of Lesina Marina (Gargano, Southern Italy) revealed by DInSAR techniques. *Geoph. Res., Abstracts*. **13**, EGU General Assembly.
- SENI S.J., JACKSON M.P.A., 1983 — Evolution of salt structures, East Texas diapir province; Part 1, Sedimentary record of halokinesis. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **67**, 8: 1219–1244.
- TARKA R., 1992 — Tektonika wybranych złóż soli w Polsce na podstawie badań mezostrukturalnych. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **137**.
- WASOWSKI J., SINGHROY V., BOVENGA F., 2005 — Using different satellite radar sensors and InSAR techniques for monitoring slope deformations *W: Proceedings of the conference Mass movement hazard in various environments*: 38–40. Kraków.
- WROTEK K., 1993 — Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski 1:50 000, arkusz Złotniki Kujawskie. Centr. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.

SUMMARY

The article presents the dependence of the model PS displacement interpolation points in relation to the configuration of the Quaternary base of salt structures of Inowrocław.

Methodology of inference by analogy, to present the motion for a salt diapir, respectively for the salt structures in the regional assessment. The structural geological analysis was performed in order to extend the prediction of tectonically active zones. The scope of work includes analysis of archival studies of geological mapping, as well as cartographic materials relating to the area of geological structures and the salt mines documentary material.

The research on terrain mobility in the region of salt dome Inowrocław was conducted using SAR interferometry techniques – PSinSAR (stage 1, performed) and DinSAR (stage 2, in progress). There were used all available archival scenes (both descending and ascending) from the satellites ERS-1 /2 and Envisat in order to determine the nature of displacement during the last 15 years. Ultimately, 31 selected satellite scenes were meet the technical condition.

Interferometric test results carried out for a salt structure (diapir) Inowrocław can be used as a methodology in planning and monitoring investment in infrastructure for the storage of hydrocarbons and carbon dioxide sequestration.